

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE
CAMPINAS**

CEATEC

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

INÁCIO HENRIQUE YANO

**ESTRATÉGIA DE *POLLING* HÍBRIDA PARA
PROLONGAMENTO DO TEMPO DE VIDA DE UMA
REDE DE SENSORES SEM FIO**

**CAMPINAS
2012**

INÁCIO HENRIQUE YANO

**ESTRATÉGIA DE *POLLING* HÍBRIDA PARA
PROLONGAMENTO O TEMPO DE VIDA DE UMA
REDE DE SENSORES SEM FIO**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão de Redes de Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Eric Alberto de Mello Fagotto

**PUC-CAMPINAS
2012**

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação - SBI - PUC-Campinas

t621.3851
Y24e

Yano, Inácio Henrique.

Estratégia de polling híbrida para prolongamento do tempo de vida de uma rede de sensores sem fio / Inácio Henrique Yano. - Campinas: PUC-Campinas, 2013.
101p.

Orientador: Eric Alberto de Mello Fagotto.
Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3. Energia - Conservação. I. Fagotto, Eric Alberto de Mello. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas. Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

22.ed.CDD – t621.3851

INÁCIO HENRIQUE YANO

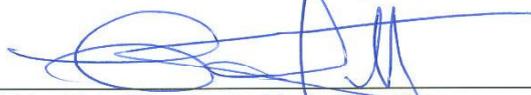
**ESTRATÉGIA DE POLLING HÍBRIDA PARA
PROLONGAMENTO DO TEMPO DE VIDA DE UMA
REDE DE SENSORES SEM FIO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

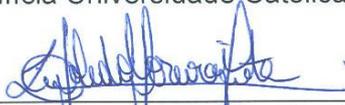
Área de Concentração: Gestão de Redes e Serviços.

Orientador: Prof. Dr. Eric Alberto de Mello Fagotto.

Dissertação defendida e aprovada em 19 de dezembro de 2012 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Eric Alberto de Mello Fagotto
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof.ª Dr.ª Lia Toledo Moreira Mota
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Jorge Diego Marconi
Universidade Federal do ABC

À minha esposa,
à minha filhinha,
aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

À Deus,
Pelas condições favoráveis e força de vontade.

Ao Prof. Dr. Eric Alberto de Mello Fagotto,
Pela perseverança, paciência e dedicação.

Ao Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho,
Pelas valiosas discussões ao longo deste trabalho,
Pela cessão da Plataforma Radiuino.

Ao Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota,
Pelas sugestões e estímulos.

Aos amigos Eduardo Veiga de Araújo, Adriana Gama Campagnuci, Juliana Machado, José Ricardo Alves, Daniel Braga e Rafael Gaudenci Marcondes Ferraz,
Pelo auxílio prestado.

Aos companheiros de empreitada Andreiwid Sheffer Corrêa, Mauricio Becker e Vitor Chaves de Oliveira,
Pelas palavras de apoio e amizade.

Ao Prof. Dr. Antônio Carlos Demanboro,
Pela nossa inclusão no Projeto FINEP-CEATEC-HIDRO,
Pelo fornecimento de sensores.

Aos demais colegas do Mestrado,
Porque juntos vamos mais longe.

"O sábio não tem conceitos inflexíveis.
Adapta-se aos dos outros."

Lao Tsé

RESUMO

YANO, Inácio Henrique. Estratégia de *Polling* Híbrida para Prolongamento do Tempo de Vida de Uma Rede de Sensores Sem Fio. 101f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campinas, 2012.

Redes de Sensores Sem Fio são redes próprias para a coleta de dados em ambientes agressivos, de difícil acesso ou de alto custo de implantação de infraestrutura cabeada. Apesar destas vantagens, tais redes muitas vezes dependem de baterias para funcionar, o que pode acarretar uma séria limitação em seus tempos de operação. Em função disso, neste trabalho, desenvolveu-se uma estratégia para o prolongamento do tempo de vida de redes de sensores, mediante a aplicação de uma estratégia de *polling* híbrida que permite reduzir a quantidade de quadros transmitidos pelo nó roteador. Desta forma, pode-se estender significativamente o tempo de vida do nó roteador e, conseqüentemente, a vida da rede. A técnica proposta torna-se progressivamente mais vantajosa, quando comparada a técnica de *polling* clássico, conforme aumenta-se o número de nós da rede. Os resultados experimentais obtidos com uma rede com quatro nós indicam uma ampliação do tempo de vida em cerca 32,14%. É importante notar que a extensão do tempo de vida da rede de sensores amplia a viabilidade econômica da tecnologia e, portanto, a torna mais acessível a potenciais usuários.

Termos de indexação: Rede de Sensores Sem Fio, Tempo de Vida, Conservação de Energia.

ABSTRACT

YANO, Inácio Henrique. *Hybrid Polling Strategy for Extending Wireless Sensor Networks Lifetime*. 2012. 101f. *Dissertation (Master in Electrical Engineering)* – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campinas, 2012.

Wireless Sensor Networks are networks suitable for data collection in harsh environments, where it would be difficult or costly the deployment of wired infrastructure. In spite of these advantages, such networks often rely on batteries to operate, which may lead to a serious limitation on the networks lifetime. Bearing this in mind, in this dissertation, it is proposed and tested a hybrid polling approach that reduces the number of frames transmitted by the router node. Thus, the router node lifetime can be extended significantly and hence the network lifetime. The proposed technique becomes progressively more advantageous, when compared to classical polling technique, as the number of network nodes increases. The experimental results obtained using a network with four nodes indicate a network lifetime increase of about 32.14%. Importantly, the sensor network lifetime extension increases the economic viability of the technology and thus makes it more accessible to potential users.

Index terms: *Wireless Sensor Networks, Lifetime, Energy Conservation*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes do sensor, figura adaptada de [25].	23
Figura 2. (a) Sensor de nível (transdutor analógico [27,28]) e (b) Sensor de vazão (transdutor digital [29,30]).	25
Figura 3. Topologias de RSSF, adaptada de [31]. (a) Ponto-a-ponto. (b) Estrela. (c) Árvore ou <i>Cluster-tree</i> . (d) Malha.	26
Figura 4. Visada entre três nós de uma rede sem fio, adaptada de [13].	27
Figura 5. Método RTS/CTS para solucionar o problema da estação oculta, adaptada de [13].	27
Figura 8. Divisão de tempo do nó coordenador distribuído entre processamento e envio de <i>pollings</i> e processamento e recebimento de dados, adaptada de [10].	29
Figura 6. Funcionamento de uma rede com a técnica do <i>polling</i> clássico, figura adaptada de [11].	30
Figura 7. Divisões de tempo do nó coordenador RT, adaptada de [10].	31
Figura 9. <i>Roll-call polling</i> em topologia estrela, adaptada de [35].	34
Figura 10. <i>Hub polling</i> em topologia anel, adaptada de [35].	34
Figura 11. Ausência de visada entre os nós ED6 e ED7.	35
Figura 12. Sequência de eventos em uma rede com quatro EDs na EPH.	36
Figura 13. Sequência de Divisões de Tempo da EPH, adaptada de [10].	37
Figura 14. Exemplo de falha de sequência em uma rede com quatro EDs na EPH.	38
Figura 15. Período de atividade para três EDs com o <i>polling</i> clássico (a) e EPH (b).	39
Figura 16. Especialização dos nós de acordo com a sua função na plataforma Radiumo42	
Figura 17. Exemplo de rede com os quatro diferentes tipos de nós, de acordo com a sua função na EPH.	44
Figura 18. Ciclos de atividade em um RT com quatro EDs, com destaque em vermelho de pequenos momentos de atividade entre períodos de dormência.	45
Figura 19. Implementação do <i>Polling</i> Clássico no Radiumo. (a) Fluxograma do programa do RT do <i>Polling</i> Clássico. (b) Sequência de eventos em um ciclo no <i>Polling</i> Clássico.	47
Figura 20. Implementação da EPH no Radiumo. (a) Fluxograma do programa do RT na EPH. (b) Sequência de eventos em um ciclo na EPH.	49
Figura 21. Divisor de tensão utilizado para possibilitar a medida da tensão da bateria, adaptada de [31].	51

Figura 22. Esquemático utilizado para os testes em ambiente fechado.....	52
Figura 23. Componentes do nó roteador, figura adaptada de [31].....	53
Figura 24. Planta do local do experimento.	54
Figura 25. Ciclos de transmissão de um <i>polling</i> clássico, adaptada de [10].	54
Figura 26. Ciclos de transmissão da EPH, adaptada de [10].....	55
Figura 27. Foto do instrumental utilizado para captura de dados de.....	55
Figura 28. Evolução do período de atividade no nó RT, conforme cresce a quantidade de EDs.	56
Figura 29. Duração dos tempos de atividade do sensor para transmissão, recepção e ocioso (<i>idle</i>).	57
Figura 30. Ciclo de atividade do nó RT com três EDs na EPH, destaque para o tempo necessário para envio de um quadro de <i>polling</i>	58
Figura 31. Período de atividade para 2 EDs. (a) <i>Polling</i> Clássico. (b) EPH	59
Figura 32. Energia consumida por ciclo de transmissão no nó RT em função do número de EDs.	60
Figura 33. Medição da tensão na bateria do RFBee em função do tempo. Em (a) RSSF com três EDs e em (b) RSSF com quatro EDs.....	62
Figura 34. Quantidade de quadros transmitidos pelo RT à BC em experimentos com três e quatro EDs.	63
Figura 35. Número de quadros transmitidos para uma rede com quatro EDs para a EPH e o <i>polling</i> clássico.	65
Figura 36. Percentual de quadros perdidos para a EPH e para o <i>polling</i> clássico em uma rede com quatro EDs.	66
Figura 37. Distribuição dos quadros segundo a medida de RSSI para o <i>polling</i> clássico.	67
Figura 38. RSSI em função do tempo para uma rede com quatro EDs. (a) EPH e (b) <i>polling</i> clássico.	69
Figura 39. RSSI em função da tensão para uma rede com quatro EDs. (a) EPH e (b) <i>polling</i> clássico.	70
Figura 40. Quadros transmitidos em um ciclo de uma rede com três EDs do <i>polling</i> clássico (a) e da EPH (b).....	72
Figura 41. Tempo de atividade do nó RT para 2 EDs no <i>polling</i> clássico.	80
Figura 42. Tempo de atividade do nó RT para 2 EDs na EPH.....	81
Figura 43. Tempo de atividade do nó RT para 4 EDs no <i>polling</i> clássico.	81
Figura 44. Tempo de atividade do nó RT para 4 EDs na EPH.....	82

Figura 45. Tempo de atividade do nó RT para 5 EDs no <i>polling</i> clássico.	82
Figura 46. Tempo de atividade do nó RT para 5 EDs na EPH.....	83
Figura 47. Tempo de atividade do nó RT para 6 EDs no <i>polling</i> clássico.	83
Figura 48. Tempo de atividade do nó RT para 6 EDs na EPH.....	84
Figura 49. Tensão no resistor de 5 Ω ligado em série com o nó RT no período de transmissão com potência máxima do RFBee.....	86
Figura 50. Tensão no resistor de 5 Ω ligado em série com o nó RT no período de recepção com potência máxima do RFBee	86
Figura 51. Tensão no resistor de 5 Ω ligado em série com o nó RT no período de transição (<i>Idle</i>) para dormência com potência máxima do RFBee.....	87
Figura 52. Tensão no resistor de 5 Ω ligado em série com o nó RT no período de dormência com potência máxima do RFBee	87
Figura 53. Foto do evaporímetro, localizado nas proximidades da Reitoria da	88
Figura 54. Foto e mapa da PUC-Campinas, reproduzidas do Site http://google.maps.com.br . (a) foto da localização do Lab. de Engenharia Ambiental e do evaporímetro e (b) mapa com a localização dos nós da rede para o teste em ambiente aberto.....	89
Figura 55. Distâncias entre o Mezanino do Laboratório de Hidráulica de Engenharia Ambiental do CEATEC até o evaporímetro. (a) tem-se o caminho em linha reta e em (b) o caminho considerando-se a localização dos sensores.	90
Figura 56. (a) Topologia da RSSF para coleta de informações de nível de água do evaporímetro, temperatura e luminosidade. (b) Distância em metros entre os pontos da RSSF do Projeto FINEP-CEATEC-HIDRO.....	91
Figura 57. Circuito utilizado para coletar os valores de tensão de acordo com o nível de água do evaporímetro em cm. Figura adaptada de [31].	92
Figura 58. Curva de calibração, Nível do líquido <i>versus</i> a Tensão na saída do sensor eTape [28].....	93
Figura 59. Saída da aplicação de medição do nível de água do evaporímetro.	94
Figura 60. Localização dos dispositivos para coleta de informações de nível de água do evaporímetro.	95
Figura 61. Amostragem de quadros recebidos na BC no CEATEC (a) e transmitidos pelo RT na Reitoria (b).....	96
Figura 62. Captura de quadros no ponto A.....	98
Figura 63. Captura de quadros no ponto B.....	98
Figura 64. Captura de quadros no ponto C	99
Figura 65. Captura de quadros no ponto D	99

Figura 66. Captura de quadros no ponto E.....	100
Figura 67. Captura de quadros no ponto F.....	100
Figura 68. Captura de quadros no ponto G	101
Figura 69. Captura de quadros no ponto H	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tempos dos ciclos em função da Quantidade de EDs em ms.	80
Tabela 2. Valores de corrente do RFBee medidos e fornecidos pelo Fabricante [43].....	85
Tabela 3. Comparação do consumo de energia entre a EPH e o <i>Polling</i> Clássico	85
Tabela 4. Valores de Tensão em Função do Nível da Água.	94
Tabela 5. Valores de RSSI recebidos em cada trecho da aplicação de coleta de dados ambientais.....	97

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....38

Equação 2.....39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	=	<i>Acknowledgment</i> , Confirmação de Recepção
BC	=	Base Central
CTS	=	<i>Clear to Send</i> , Livre para Envio
DA	=	<i>Data Aggregation</i> , Agregação de Dados
DARPA	=	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DSN	=	<i>Distributed Sensor Networks</i> , Rede de Sensores Distribuídas
ED	=	<i>End Device</i> , Nó Coletor de Dados
EPH	=	Estratégia de <i>Polling</i> Híbrida
GSAC	=	Grupo de Sustentabilidade Ambiental para as Cidades
IDE	=	<i>Integrated Development Environment</i> , Ambiente de Desenvolvimento Integrado
IEEE	=	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> , Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica
RN	=	<i>Relay Node</i> , Nó Repetidor
RSSF	=	Rede de Sensores sem Fio
RSSI	=	<i>Received Signal Strength Indication</i> , Indicador de Intensidade de Sinal Recebido
RT	=	Nó Roteador
RTS	=	<i>Request to Send</i> , Requisição para Envio
TDMA	=	<i>Time Division Multiple Access</i> , Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo
<i>Tidle</i>	=	Divisão de Tempo de <i>Idle</i>
<i>Tpoll</i>	=	Divisão de Tempo de <i>Polling</i>
Ttx	=	Divisão de Tempo de Transmissão
WDT	=	<i>Watchdog Timer</i>
WPAN	=	<i>Wireless Personal Area Networks</i> , Redes Pessoais Sem Fio

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	18
1.1. Motivação	21
1.2. Objetivo do Trabalho.....	21
1.3. Organização da dissertação	22
CAPÍTULO 2 – REDE DE SENSORES SEM FIO	23
2.1. Histórico.....	23
2.2. Topologias de RSSF.....	25
2.3. O Problema da Estação Oculta.....	26
2.4. Trabalhos Relacionados	28
CAPÍTULO 3 - ESTRATÉGIA DE POLLING HÍBRIDA (EPH).....	33
3.1. Técnicas de <i>Polling</i>	33
3.2. A Estratégia de <i>Polling</i> Híbrida (EPH).....	35
3.3. Cálculo da Energia Consumida por Ciclo de Transmissão.....	38
3.4. Agregação de Dados	40
CAPÍTULO 4 - IMPLEMENTAÇÃO DA EPH NA PLATAFORMA RADIUINO	41
4.1. Descrição do Radiuino.....	41
4.2. Descrição da Implementação da EPH no Radiuino.....	42
4.3. Algoritmo das Rotinas de <i>Polling</i>	46
4.3.1. Algoritmo da Rotina RT no <i>Polling</i> Clássico.....	46
4.3.2. Algoritmo da Rotina RT da EPH	48
4.4. Configuração do RFBee para Mensuração da Tensão da Bateria.	50
CAPÍTULO 5 - SISTEMA EXPERIMENTAL.....	52
5.1. Sistema Experimental para medições em ambientes fechados.....	52
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS	56
6.1. Atividade dos Nós Roteadores por Ciclo de Transmissão: EPH <i>versus</i> <i>Polling</i> Clássico.....	56
6.2. Estimativa da Energia Dispendida por Ciclo de Transmissão no nó RT	60
6.3. Tempo de vida do nó RT.....	61
6.4. Avaliação da EPH e do <i>Polling</i> Clássico mediante a RSSI.....	66
6.5. Agregação de Dados	71
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO.....	73
REFERÊNCIAS.....	75
ANEXO A – Períodos de atividade do RT na EPH e no <i>polling</i> clássico.....	80
ANEXO B – Valores de tensão, corrente e energia dos diversos estágios, pelo qual o nó RT passa em cada um de seus ciclos.	85
APÊNDICE A – Aplicação para medição do nível de água em um evaporímetro	88
a) Calibração dos Sensores.....	91
b) Teste de comunicação.....	95
APÊNDICE B – Captura dos quadros nos pontos de coleta, tratamento e replicação dos dados.	98

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são redes de baixo custo, que implementam o padrão do Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica (*Institute of Electrical and Electronic Engineers - IEEE*) 802.15.4 [1] e que se mostram apropriadas para a coleta de dados em ambientes agressivos e de difícil acesso, onde a implantação e a manutenção de infraestrutura cabeada não seria viável. Exemplos de aplicação de RSSF incluem: o monitoramento em campos de batalha, em florestas [2], fazendas [3], indústrias [4] dentre outros. Apesar de a independência de uma infraestrutura cabeada ser um dos grandes atrativos das RSSFs, esta também pode constituir-se em um importante limitante no que se refere ao tempo de vida da rede, visto que ela será usualmente alimentada por baterias.

Como os nós das RSSFs têm alcance restrito, é usual que os nós coletores de dados (*End Devices – ED*) dependam de nós roteadores (RT) para transmitir a informação para uma base central (BC) [5]. Entretanto, um nó RT pode ficar inoperante pelo esgotamento de sua bateria, o que, normalmente, não ocorre de modo simultâneo com todas as baterias dos demais nós da rede [6]. Como resultado, vários nós EDs poderiam ficar impedidos de enviar informação à base central, por conta da interrupção de um nó RT. Desta forma, torna-se evidente a importância de se prolongar o tempo de vida da rede como um todo, a fim de se evitar a formação de nós órfãos [7], que acontece quando os nós que fazem o roteamento de uma dada parte da rede ficam inativos prematuramente, de forma que, todos os nós que destes dependem, para transmitir seus dados, tem seu caminho interrompido.

Dentre os fatores que mais contribuem para o desperdício de energia em RSSFs podem-se destacar [8,9]:

- 1) Tempo de *idle listening* (que é o tempo que o nó fica aguardando dados a serem recebidos);
- 2) Retransmissões devido a colisões de pacotes;

- 3) *Overhearing* (quando um nó recebe quadros destinados a outros nós)
- 4) Sobrecarga pelo excesso de quadros de controle como Requisição para Envio (*Request to Send* - RTS) e Livre para Envio (*Clear to Send* - CTS) e Confirmação de Recepção (*Acknowledge* - ACK);
- 5) *Over-emitting* (ocorre quando se faz a transmissão para um nó que não está pronto para recebê-la).

O consumo devido aos fatores 1 e 2 podem ser diminuídos por meio da técnica do Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (*Time Division Multiple Access* - TDMA), que permite a combinação de períodos de atividade e dormência, proporcionando baixo consumo de potência [10]. Além disso, evita uma eventual interferência ocasionada pelo fato de muitos EDs estarem se conectando ao mesmo tempo ao RT [11], visto que cada ED terá um momento adequado (*time slot*) para comunicação. Uma das formas de operar uma rede com TDMA é utilizando-se a técnica de *polling* [12], na qual, em uma divisão de tempo, um nó mestre consulta um nó escravo se o mesmo possui dados a transmitir. Caso o nó escravo tenha dados a transmitir o fará na próxima divisão de tempo. Como os nós escravos somente podem transmitir em resposta a uma consulta do nó mestre, evitam-se colisões.

As redes sem fio sofrem degradação de desempenho devido a colisões, que muitas vezes são causadas pelo problema da estação oculta, cuja ocorrência deve-se a presença de duas ou mais estações transmissoras de dados, que tem visada para um nó receptor, mas não tem visada entre si, desta forma, cada estação transmissora é uma estação oculta [13] para a(s) outra(s) estação(ões) transmissora(s). O problema acontece quando uma das estações transmissoras já está transmitindo para o nó receptor e outra estação transmissora, tendo dados a transmitir, escuta o meio para fazer sua transmissão, devido ausência de visada para a estação oculta, não detecta a comunicação em curso e inicia sua transmissão, que gerará interferência para ambas as transmissões. Para atenuar este problema existe uma técnica baseada em quadros de controle, na qual, o nó receptor somente autoriza a transmissão de dados, caso o canal esteja livre, ou seja, o nó transmissor faz uma solicitação para envio de dados (RTS) e recebe a permissão para enviar os dados se o canal estiver livre (CTS), evitando-se

colisões, pois se um nó transmissor receber um quadro CTS destinado a outro nó, é um indício de canal ocupado e, portanto, deve-se aguardar sua desocupação para fazer qualquer transmissão a este nó receptor.

O consumo devido ao fator 3 pode ser reduzido, programando-se os nós, de forma que, aqueles que não estiverem participando de uma comunicação, ao receberem um RTS, entrariam em dormência e, portanto, não receberiam os quadros da comunicação que estaria a começar [14].

Os problemas de consumo relacionados ao fator 4 podem ser atenuados, eliminando-se sinais de controle explícitos [15]. Por exemplo, o retorno a um *polling*, que é um quadro enviado para consultar uma estação se a mesma tem dados a transmitir, pode ser o próprio quadro com os dados e não, necessariamente, um quadro específico de ACK [16]. E em uma estratégia de *polling* não são necessários os controles de RTS e CTS, porque o problema da estação oculta é atenuado, uma vez que cada nó deve aguardar o *polling* para transmitir seus dados [17].

O consumo devido ao fator 5 também pode ser solucionado por meio da técnica do TDMA, uma vez que cada nó terá a sua divisão de tempo predefinida para comunicar-se. Somente será preciso garantir que esteja ativo no momento da transmissão, podendo permanecer em dormência no restante do tempo [18].

Desta forma, objetivando-se obter uma solução a mais completa possível para a extensão do tempo de vida de uma RSSF, neste trabalho propôs-se e testou-se uma técnica que proporciona a diminuição do consumo relacionado aos cinco fatores descritos acima. A melhoria proporcionada é mais significativa em especial, no que se refere ao fator 1, que envolve o tempo de *idle listening*, o que é conseguido por meio de uma modificação de uma solução de *polling* presente na literatura [10]. Observa-se que o consumo de energia durante o tempo de *idle listening* é comparável ao consumo durante transmissões e recepções [19,20] e, portanto, torna-se claro a importância de sua diminuição.

Com a utilização do TDMA, também se reduzem as colisões (fator 2), pois cada nó terá um momento próprio para fazer transmissões e recepções e, por este mesmo motivo, poderão permanecer em estado de dormência no restante do tempo, não interferindo em outras transmissões. Além disso, não sofrerão com o *overhearing* (fator 3), sendo apenas necessário ter-se o cuidado de os nós já

estarem ativos quando do momento alocado (*slot time*) para o início de suas transmissões (fator 5).

Utilizando-se do quadro de dados como sinal de recebimento do *polling*, torna-se desnecessário o sinal ACK. Por meio da adoção do TDMA reduzem-se as colisões (vide parágrafo anterior) e, portanto, os controles RTS e CTS podem ser eliminados, diminuindo-se os efeitos devidos ao fator 4.

Finalmente, é importante notar que a solução de *polling* com TDMA pode ser implementada em um hardware de baixo custo [12] e que a solução desenvolvida ao longo deste trabalho abre portas para uma possível implementação da mesma como um produto. Uma revisão específica dos trabalhos relacionados à proposta contida nesta dissertação é apresentada no Capítulo 2.

1.1. Motivação

Uma vez que grande parte das RSSF opera a partir de baterias [21], torna-se imediato entender a motivação para o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas que minimizem o consumo de energia, prolongando o tempo de vida destas redes. De acordo com o reportado na literatura [22], a diminuição do consumo de energia consiste em um dos maiores problemas operacionais destas redes, isto em função do alto custo e da dificuldade na troca ou recarga das baterias. A implantação deste aprimoramento irá possibilitar um considerável crescimento no tempo de vida das redes de sensores sem fio, que se utilizam do artifício de TDMA com *polling* [17].

1.2. Objetivo do Trabalho

Propor uma nova técnica de *polling*, que contribua com os esforços mundiais voltados à obtenção de RSSFs que operem com maior eficiência

energética. Uma consequência direta disso é proporcionar o prolongamento do tempo de vida de RSSFs que utilizam baterias para alimentação. Conforme descrito anteriormente, estas constituem a maior parte das RSSFs e apesar da contínua redução do consumo de energia de seus componentes ainda se deparam com o problema de seu tempo de vida estar aquém das necessidades das suas aplicações [23]. Deste modo, o objetivo geral desta dissertação é a aplicação e o desenvolvimento de técnicas destinadas a um uso mais eficiente de energia em RSSFs e o consecutivo prolongamento do tempo de vida das mesmas.

1.3. Organização da dissertação

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão das RSSFs e uma introdução ao problema do prolongamento do tempo de vida destas redes em função do consumo de energia. Além disso, discutem-se os principais trabalhos relacionados à solução aqui apresentada.

Já no Capítulo 3, apresenta-se a técnica da Estratégia de *Polling* Híbrida (EPH), que é a principal contribuição deste trabalho e daqui em diante designada somente por EPH.

No Capítulo 4, discutem-se os algoritmos desenvolvidos para a implementação da EPH e da técnica de *polling* clássico na Plataforma Rádiumo.

O Capítulo 5 trata do sistema experimental utilizado na validação da proposta investigada ao longo deste trabalho.

No Capítulo 6, apresentam-se os resultados e a discussão dos mesmos.

Finalmente, no Capítulo 7, apresentam-se as conclusões deste trabalho, bem como perspectivas para a sua continuação.

Decidiu-se por manter alguns poucos termos de acordo com a sua grafia em língua inglesa, principalmente pela ausência de um consenso na tradução para o português e objetivando-se uma maior clareza no texto.

CAPÍTULO 2 – REDE DE SENSORES SEM FIO

Neste capítulo revisa-se a operação de RSSFs, enfatizando-se os aspectos relevantes para a discussão apresentada nesta dissertação.

2.1. Histórico

As RSSFs foram precedidas pelas Redes de Sensores Distribuídas (*Distributed Sensor Networks - DSN*), desenvolvidas pela *Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)*. Em torno de 1980, e, no início, os sensores eram pouco compactos e utilizados em um número restrito de aplicações [21]. Em termos gerais, um nó sensor possui uma estrutura de acordo com a Figura 1, contando com as seguintes unidades: transdutor, processador, memória, transceptor e alimentação (unidade de potência).

Os sensores tornaram-se menores e mais baratos devido aos avanços tecnológicos [21]. Em 2003, criou-se o padrão IEEE 802.15.4 para Redes Pessoais Sem Fio (*Wireless Personal Area Networks - WPAN*) de baixa taxa [24].

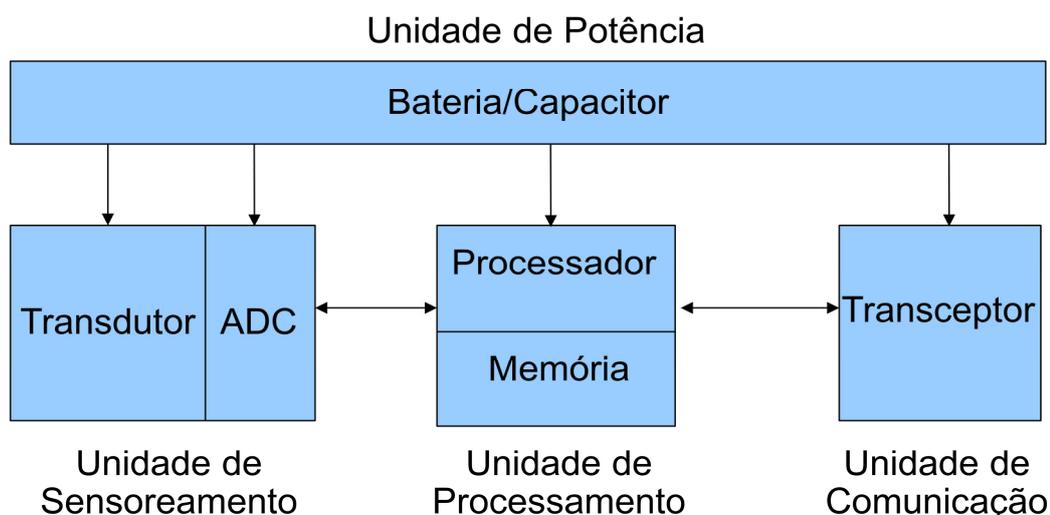


Figura 1. Componentes do sensor, figura adaptada de [25].

Os sensores possuem processador embarcado, cuja função é agendar tarefas, processar dados e controlar os demais componentes do sistema. O transceptor é o responsável pela comunicação do nó sensor, possuindo quatro estados de operação: transmitindo, recebendo, ocioso e dormente. A memória de programação é do tipo *flash*, na qual fica gravado o *firmware* do nó sensor, além da memória RAM do microprocessador. A energia necessária para o funcionamento do nó sensor é normalmente suprida por baterias ou capacitores, que formam sua unidade de potência [21].

Na busca pela autossustentabilidade da unidade de potência, surgiram sistemas que recarregam as baterias a partir da energia captada da luz solar. Contudo, tal solução não se aplica a todas as RSSFs, porque [26]:

- 1) Demanda custos adicionais de instalação;
- 2) A energia captada a partir de painéis solares é proporcional à área dos mesmos, o que pode tornar o painel muito maior que o nó sensor. Esta desproporção poderia inviabilizar a solução, uma vez que os sensores foram projetados para serem pequenos;
- 3) Existem aplicações em locais sem luz, seja de forma permanente ou em determinados horários.

Transdutores são dispositivos desenvolvidos com o objetivo de converter sinais não elétricos (temperatura, luminosidade, pressão, etc) em sinais elétricos. A Figura 2 ilustra dois tipos de transdutores.

Os sinais advindos dos transdutores podem ser analógicos (Figura 2a) ou digitais (Figura 2b). Caso sejam analógicos, passam por um conversor analógico digital [25] para depois serem processados, armazenados e enviados para o seu destino final. Caso o sinal já seja digital, não precisa passar por conversão alguma para ser tratado e transmitido.

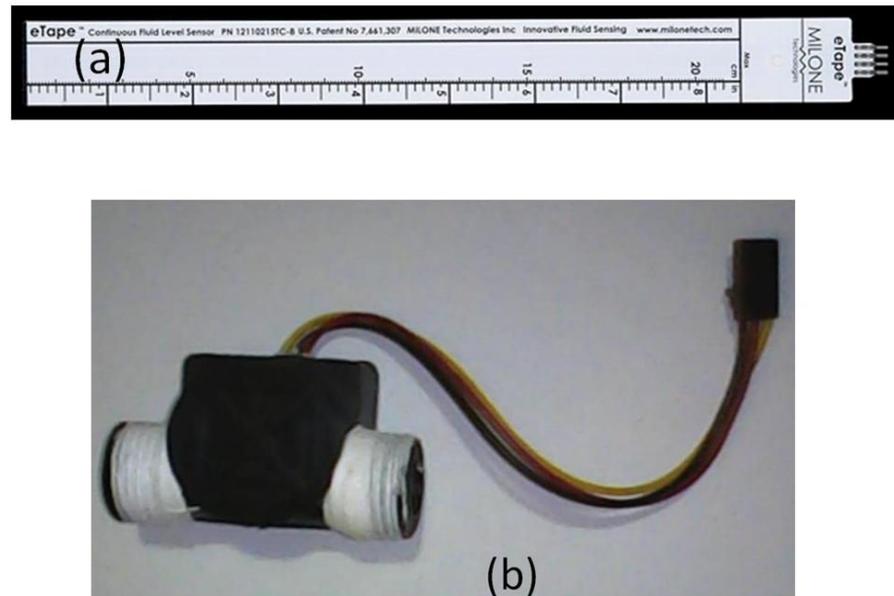


Figura 2. (a) Sensor de nível (transdutor com sinal de saída analógico [27,28]) e (b) Sensor de vazão (transdutor com sinal de saída digital [29,30])

2.2. Topologias de RSSF

A Figura 3 mostra as quatro topologias para redes de sensores [31]:

- a) Ponto-a-ponto – É a topologia mais simples e a comunicação é estabelecida aos pares (Figura 3a).
- b) Estrela – Nesta topologia, há um nó denominado coordenador que se conecta com os demais EDs e toda a comunicação é centralizada no mesmo (Figura 3b).
- c) Árvore ou *Cluster-tree* – É uma topologia empregada para unir *clusters* em redes que se caracterizam por ter muitos nós dispersos em uma grande área. Dentro de cada *cluster*, a topologia é similar à topologia estrela e a comunicação *inter-cluster* existe para vários saltos e uma melhor coordenação dos EDs (Figura 3c).
- d) Malha – Os nós podem estar conectados a vários outros nós e tem-se a vantagem de possibilitar a comunicação com nós distantes, por meio de vários saltos e vários caminhos. Desta forma, quando um caminho estiver interrompido pode-se utilizar outro (Figura 3d).

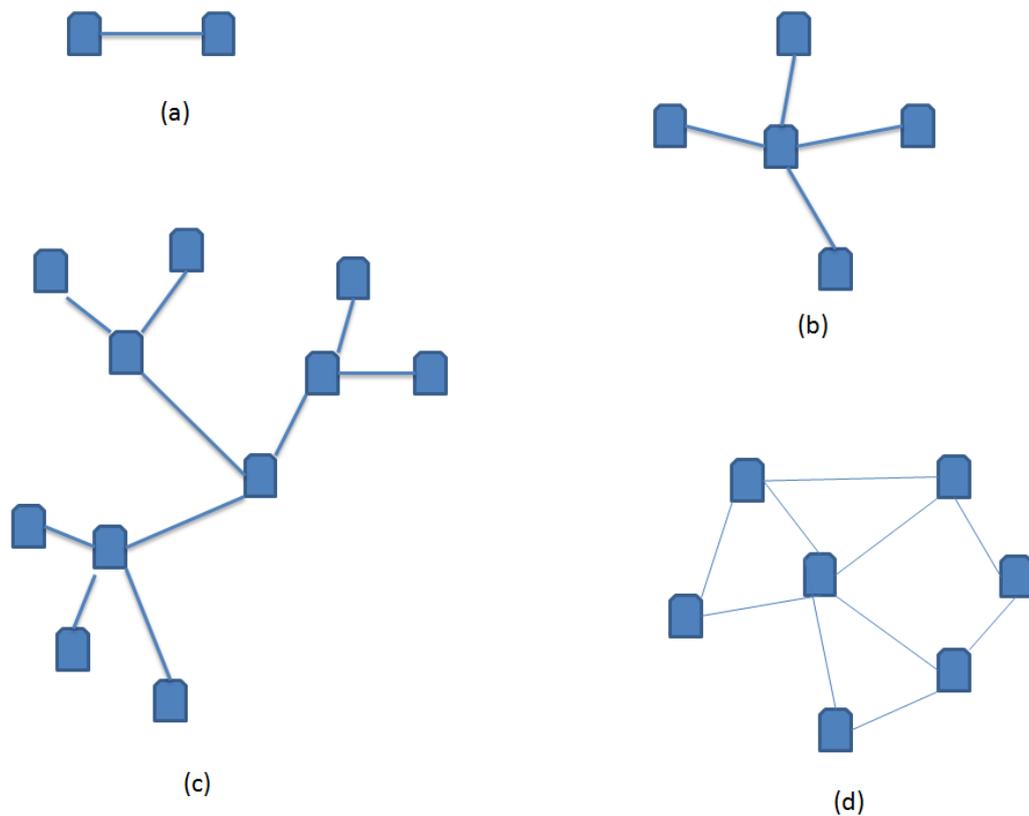
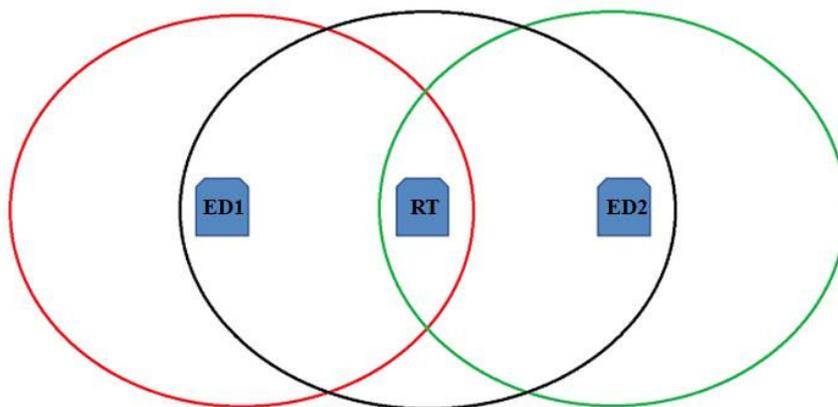


Figura 3. Topologias de RSSF, adaptada de [31]. (a) Ponto-a-ponto. (b) Estrela. (c) Árvore ou *Cluster-tree*. (d) Malha.

2.3. O Problema da Estação Oculta

Trata-se de um problema particular das redes sem fio. É a interferência na comunicação causada por um nó, que não está na visada do nó transmissor [13]. A Figura 4 ilustra a visada de três nós. O nó RT tem visada para os nós ED1 e ED2. Estes, por sua vez, somente têm visada para o nó RT. Nesta situação, ED1 é para ED2 uma estação oculta e vice-versa. O problema acontece quando um transmissor, por exemplo, ED2, não detectando a presença de ED1, em função da ausência de visada, inicia uma transmissão para RT, o que poderá resultar em colisão entre os pacotes dos dispositivos [13].



Visada de ED1 em Vermelho

Visada de RT em Preto

Visada de ED2 em Verde

Figura 4. Visada entre três nós de uma rede sem fio, adaptada de [13].

Para contornar este problema, são utilizados dois quadros de controle RTS e CTS no processo de comunicação. Assim, o nó que tem dados a transmitir enviará primeiramente um RTS para o nó destino e, caso este esteja com seu canal disponível, responderá com um CTS, autorizando a transmissão.

A Figura 5 mostra a sequência de eventos, que se utiliza do método RTS/CTS, para solucionar o problema da estação oculta.

Para evitar um possível problema de colisão, descrito na explanação da Figura 4, o nó ED2 também receberia o quadro CTS do nó RT para o nó ED1 (Figura 5), indicando que há uma comunicação em processo e que, portanto, teria que aguardar para enviar um quadro de RTS para iniciar a sua transmissão.

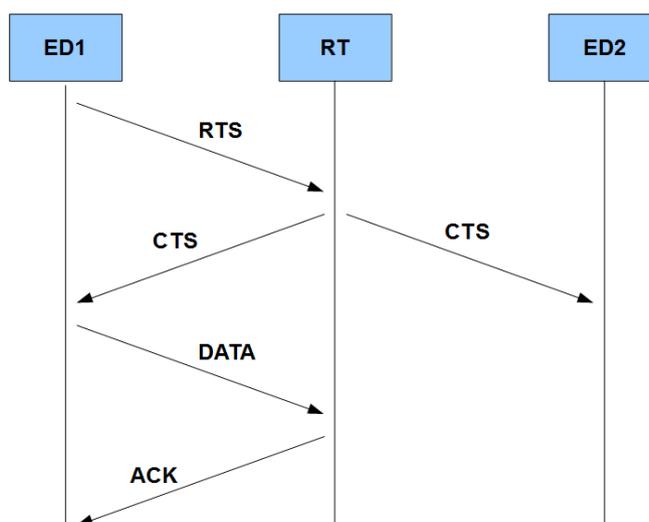


Figura 5. Método RTS/CTS para solucionar o problema da estação oculta, adaptada de [13].

O método com a utilização dos quadros RTS/CTS resolve o problema da estação oculta desde que: (i) todos os nós estejam sincronizados, (ii) a taxa de transmissão seja única e (iii) todos os pacotes tenham o mesmo tamanho. Tais requisitos são necessários para que o nó, com dados a transmitir, possa receber o CTS destinado a outros nós e, com isto, aguarde um momento mais adequado para iniciar a comunicação.

O problema do método RTS/CTS é que este gera uma sobrecarga no tráfego, uma vez que se aumenta consideravelmente o número de mensagens de controle trocadas para habilitar-se uma transmissão.

Observa-se que (vide Capítulo 1) a técnica de *polling* é uma solução tanto para redução do tempo de *idle listening* como para evitar-se o problema de colisões. Com o problema das colisões controlado, tornam-se desnecessários os quadros de controle RTS/CTS. Na próxima seção, serão discutidos alguns trabalhos relacionados a esta técnica.

2.4. Trabalhos Relacionados

Nesta seção, descreve-se a técnica de *polling* e, em seguida, apresentam-se dois trabalhos, que se utilizam desta técnica para solucionar o problema de colisões [11] e para economia de energia, por meio da aplicação da técnica de dormência nas divisões de tempo em que a rede estiver ociosa [10].

Polling é um método de controle de acesso a um canal de comunicação compartilhado por várias estações [32]. Trata-se de uma técnica que evita colisões porque cada estação terá seu momento certo para fazer suas transmissões [11].

No *polling*, o controle é centralizado, ou seja, existe um coordenador que fará as requisições por dados das estações, em uma ordem previamente definida. Cada estação, portanto, terá sua fatia de tempo para receber a requisição e fazer a transmissão para o coordenador. Esta alocação de tempo é que livra esta solução de colisões.

Na Figura 6, é ilustrada a Divisão de Tempo do Coordenador. As setas em cinza indicam os quadros com os *pollings* e as setas em vermelho representam a resposta dos EDs com os dados. O tratamento e envio dos *pollings* está representado por retângulos menores. A recepção e o tratamento dos dados por retângulos com a identificação do ED que enviou o quadro, ou seja, as divisões de tempo numeradas com ED1, ED2 e ED3 referem-se às divisões de tempo para os dados recebidos de ED1, ED2 e ED3, respectivamente. O tempo de ociosidade está representado pela divisão de tempo com a inscrição *Idle*.

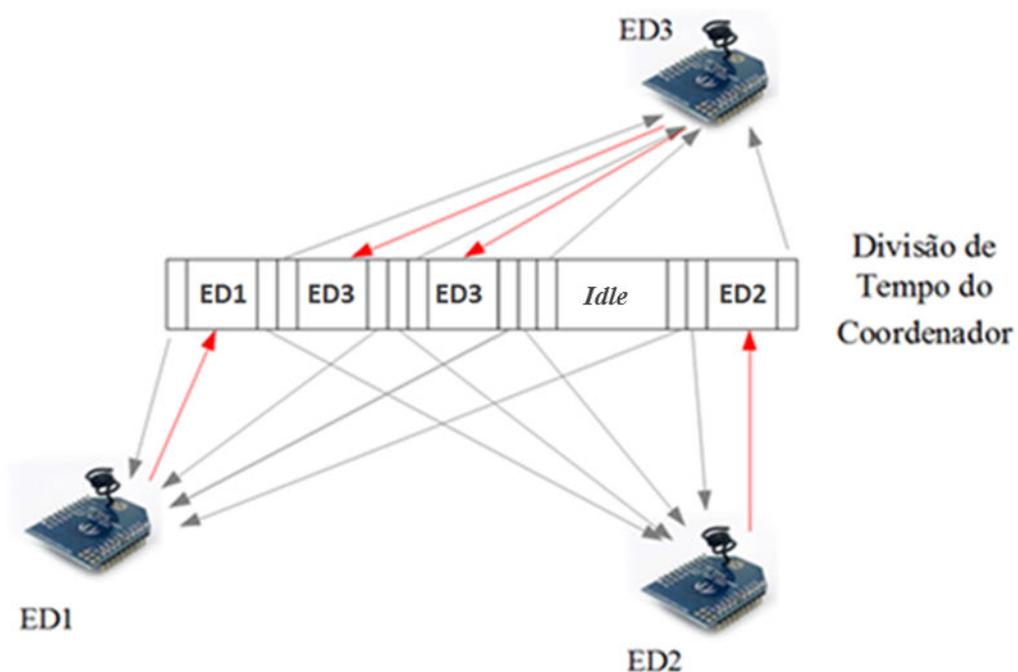


Figura 6. Divisão de tempo do nó coordenador distribuído entre processamento e envio de *pollings* e processamento e recebimento de dados, adaptada de [10].

Em [11], discute-se uma implementação de técnica de *polling* clássico, que de agora em diante, será designada somente por *polling* clássico. Nesta técnica, o nó coordenador faz requisições de dados aos EDs, seguindo uma ordem predefinida e cada ED somente fará a transmissão após ao receber tal requisição, evitando-se colisões, conforme ilustrado na Figura 7. A relevância deste trabalho [11] está na característica cíclica para a aquisição de dados via *polling*, apesar desta solução não tratar do problema do consumo de energia devido à ociosidade

no estado de *idle listening*, que é o fator de maior desperdício em termos energéticos.

Soluções em que os roteadores não entram em dormência [33], baseiam-se no fato que os mesmos devam estar acordados no momento em que um ED transmitir seus dados. Nestes casos, a fim de permitir uma quantidade maior de operações, deve haver uma capacidade maior de energia armazenada no sistema de alimentação do mesmo. Apesar disso, mesmo em tais casos, a melhoria da eficiência energética do sistema ainda será um atributo desejável [34]. Isto é, mesmo com baterias de maior capacidade de energia armazenada a grande diferença de consumo de energia entre o RT e os EDs pode ocasionar um tempo de vida menor para o RT [6].

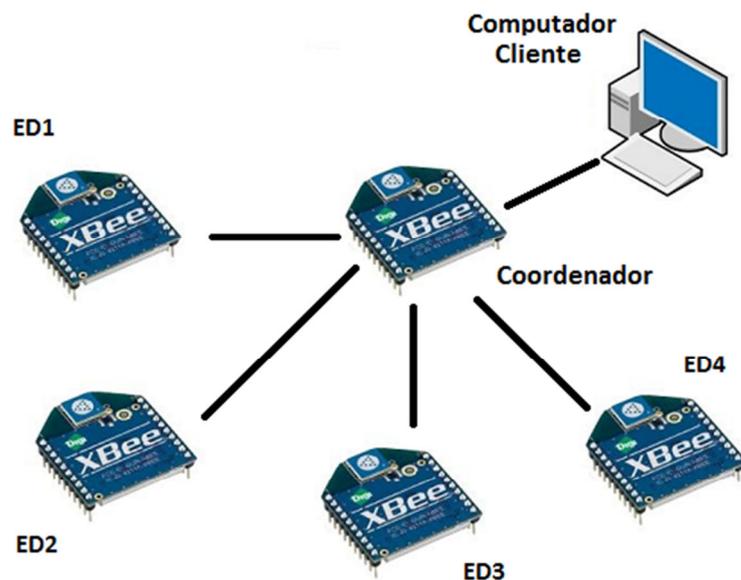


Figura 7. Funcionamento de uma rede com a técnica do *polling* clássico, figura adaptada de [11]

Em [10] apresenta-se um estudo utilizando-se a técnica de *polling*, que se diferencia de [11] por aplicar a técnica de dormência no nó coordenador nas divisões de tempo em que não haja atividade, com bons resultados na busca da solução dos problemas relacionados aos fatores 1, 2 e 5 mencionados no Capítulo 1, que são:

- 1) Baixo consumo de energia [10];

- 2) A eliminação de colisões, uma vez que cada ED terá a sua divisão de tempo para a comunicação [11] e
- 3) Redução do over-emitting, pois os EDs estarão em atividade no momento que o RT fizer o *polling* e o RT, também, estará em atividade para receber os dados como resposta aos *pollings* [18]. Quando não houver mais dados a serem transmitidos, o RT enviará um quadro sinalizando para todos os EDs entrarem em dormência, até que se inicie um novo ciclo (Figura 8).

A Figura 8 ilustra a divisão de tempo de três EDs sendo coordenados pelo RT. As divisões de tempo mais estreitas, sem inscrição em seu interior, representam as solicitações por dados (Divisão de Tempo de *Polling* (T_{poll})), as divisões de tempo identificadas por ED correspondem aos quadros com os dados em resposta ao *polling* (Divisão de Tempo de Transmissão (T_{tx})) e as identificadas como divisões de tempo de *Idle* indicam os intervalos de dormência (Divisão de Tempo de *Idle* (T_{idle})), que somente surgem após um comunicado feito pelo RT para todos os nós entrarem em dormência.

Na primeira sequência para transmissão, apenas os EDs 1 e 3 possuem dados a serem transmitidos. Na segunda sequência, somente o ED 3 tem dados para transmissão. Na terceira sequência, nenhum ED tem dados para transmitir e, neste momento, como não há retorno às suas solicitações de dados, o RT envia um sinal para todos os nós dormirem por um certo período. Terminado o período de dormência, reinicia-se o processo de solicitação de dados (*pollings*) e desta vez somente o ED 2 tem dados para transmitir.

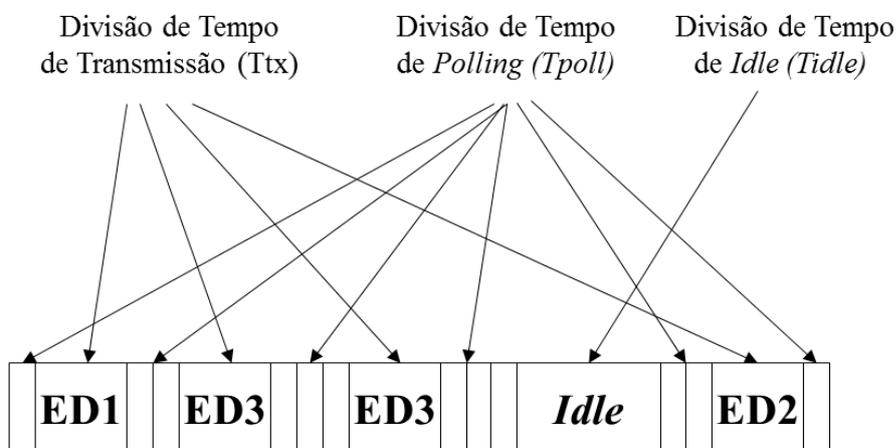


Figura 8. Divisões de tempo do nó coordenador RT, adaptada de [10]

Esta solução apresentada em [10] é mais apropriada para a aquisição de dados de forma não cíclica, ou seja, os EDs podem ou não ter dados a transmitir, mas precisam sempre ser consultados, porque somente transmitem ao receberem uma chamada do coordenador.

A importância de [10] está em sua estratégia de dormência, bem como, a importância do trabalho apresentado em [11] está na forma cíclica de obtenção dos dados. Estas duas características serão exploradas no próximo capítulo, no qual se descreve a Estratégia de *Polling* Híbrida (EPH).

CAPÍTULO 3 - ESTRATÉGIA DE POLLING HÍBRIDA (EPH)

Na última seção do Capítulo 2, descreveram-se dois trabalhos que utilizavam a técnica de *polling* para controle de acesso ao meio. Em [11] a aquisição de dados é feita de forma cíclica e em [10] existe uma proposta eficaz para a aplicação de dormência nos RTs, especialmente, para uma situação em que não se espera regularidade na recepção de dados.

Neste trabalho, apresenta-se uma proposta denominada Estratégia de *Polling* Híbrida (EPH), que se utiliza de duas técnicas de *polling*, o *hub polling* e o *roll-call polling* [35].

A EPH utiliza-se do *hub polling* como primeira opção. O *hub polling* confere à EPH melhor desempenho comparativamente ao *polling* clássico ou *roll-call polling*, mas exige a formação de um anel de EDs para o seu pleno funcionamento. Quando não for possível se valer do *hub polling*, devido à quebra do anel, a EPH utiliza-se do *roll-call polling* ou *polling* clássico para garantir, mesmo nestas situações adversas, regularidade no funcionamento da rede.

3.1. Técnicas de *Polling*

Nos parágrafos anteriores, descreveu-se, brevemente, a EPH, nesta seção, apresentam-se, a seguir, as técnicas de *polling* [35] envolvidas nesta estratégia:

1. *Roll-call polling* – nesta técnica, o coordenador faz as chamadas para todas as estações, sequencialmente, de acordo com uma tabela, ou seja, o coordenador faz a requisição a uma determinada estação e depois de receber a resposta da mesma, passa para a estação seguinte. Esta forma de controle é apropriada para redes de topologia em estrela e árvore, conforme mostra a Figura 9, na qual os círculos representam estações em uma rede de computadores.

2. *Hub polling* – nesta técnica, o coordenador faz a chamada somente para a primeira estação e esta fará o repasse da requisição para a segunda estação da sequência e assim sucessivamente até que se chegue à última estação, que passará o controle para o coordenador, encerrando-se o ciclo. O *hub polling* é apropriado para redes de topologia em anel e costuma ter desempenho superior ao *roll-call polling* para redes de grande extensão, no tempo do ciclo, ou seja, permite uma vazão maior de dados. Na Figura 10 os círculos representam as estações em uma rede de computadores e a seta indica o sentido e conseqüentemente a ordem que as estações são chamadas.

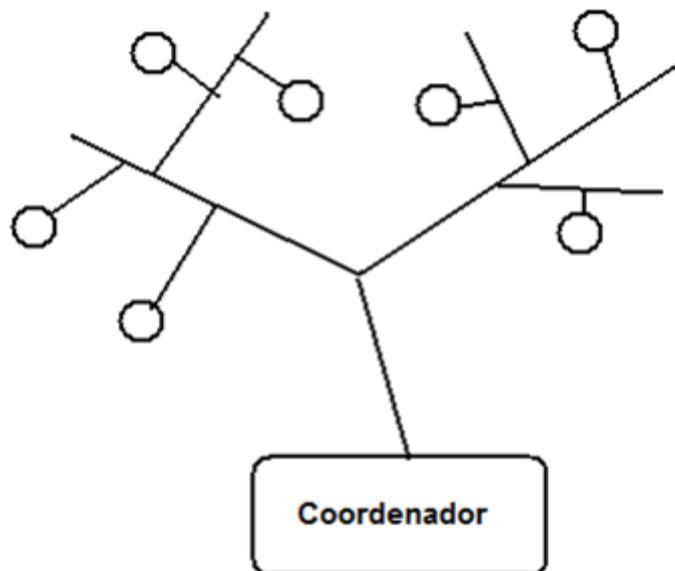


Figura 9. *Roll-call polling* em topologia estrela, adaptada de [35].

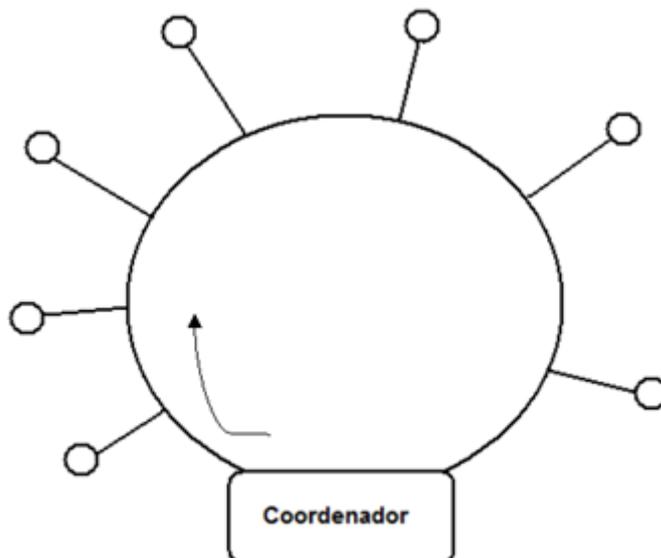


Figura 10. *Hub polling* em topologia anel, adaptada de [35].

3.2. A Estratégia de *Polling* Híbrida (EPH)

A EPH reúne as duas técnicas de *polling* descritas na seção 3.1. O *hub polling* é sempre a primeira opção para a aquisição dos dados dos EDs pelo RT em relação ao *roll-call polling*, porque tem melhor desempenho em termos de tempo de resposta ao *polling* e, particularmente para RSSFs, de economia de energia. No entanto, para que tal técnica seja aplicada com bom desempenho, é necessário que os nós da rede tenham visada entre si para a formação do anel.

A Figura 11 mostra uma situação de falha de sequência, representada pela seta interrompida por um X vermelho, de modo que ED6 não se comunica com ED7. Tal situação decorre de problemas de visada entre os EDs ou por causa de algum problema físico de algum ED. Nestes casos, a EPH adota o *roll-call polling*. Quando não existe a possibilidade de formação de qualquer sequência, ou seja, não é possível aplicar-se o *hub polling*, a solução proposta em [10] ainda é mais indicada.

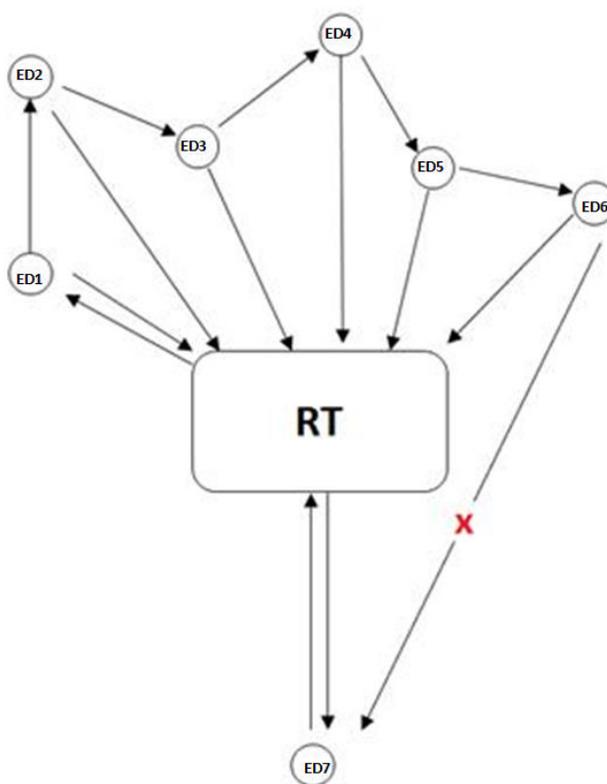


Figura 11. Ausência de visada entre os nós ED6 e ED7.

A Figura 12 ilustra uma situação típica de comunicação na EPH, com o RT fazendo também o papel de coordenador. Conforme já mencionado, os EDs devem ter visada entre si. Atendida esta condição, o RT somente precisa fazer o *polling* para o primeiro ED. Este *polling* é representado na Figura 12 pela seta com a inscrição “POLL”. A resposta do ED1 ao *polling* será o quadro com os dados “DATA1”. Como o ED2 está supostamente na visada do ED1, também receberá o quadro “DATA1” enviado ao RT. O quadro “DATA1”, também recebido por ED2, é o sinal para que ED2 transmita seus dados para o RT, ou seja, o ED2 não precisa de um *polling* específico para encaminhar seus dados. Simplesmente o fará na sequência de ED1, poupando uma transmissão de *polling* de RT em relação ao *polling* clássico.

A mesma estratégia valerá para os demais EDs da rede. Desta forma, o RT, assim como ED3 receberão o quadro com os dados de ED2, representado na Figura 12 pela seta denominada “DATA2”. “DATA2” é o sinal para o ED3 enviar os seus dados, da mesma forma que ED2 procedeu. O último ED da Figura 12 é o ED4, que, depois de receber “DATA3”, enviará “DATA4” para RT, encerrando-se o ciclo, momento em que RT pode iniciar seu período de dormência.

Quanto maior o número de nós, mais significativa deverá ser a economia de energia do RT, comparativamente ao *polling* clássico, uma vez que somente se enviará um *polling* por ciclo. Espera-se que isto proporcione uma menor quantidade de energia dispendida por ciclo, resultando em um tempo de vida maior para o RT na EPH, que no *polling* clássico.

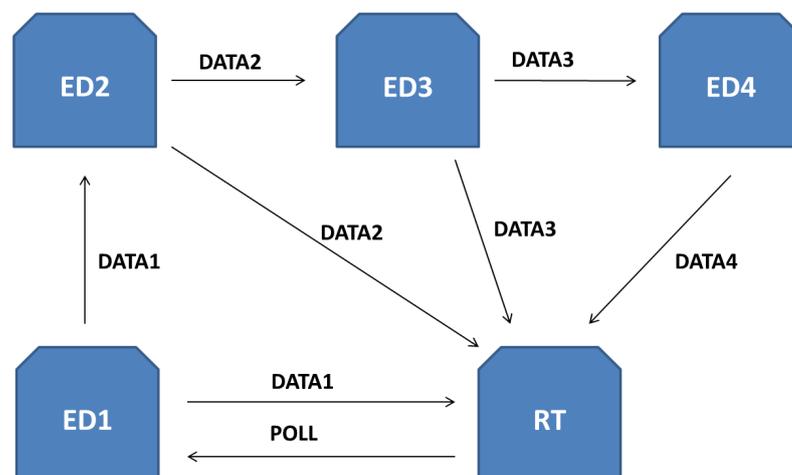


Figura 12. Sequência de eventos em uma rede com quatro EDs na EPH

A Figura 13 ilustra a sequência de alocações de tempo (*slot*) no RT de acordo com a EPH para coletar os dados de quatro EDs. O ciclo inicia-se com uma divisão de tempo de *polling* para o ED1, seguido de quatro divisões de tempo que representam os dados vindos de ED1, ED2, ED3 e ED4. Isto acontece porque somente o ED1 precisa receber um *polling* de RT para o ciclo iniciar-se, visto que os demais enviarão seus dados ao receberem o quadro com os dados do ED imediatamente anterior da sequência de EDs. O processo repetir-se-á até que o último ED envie seus dados, neste caso, ED4, que indica o final do ciclo e o início do período de dormência representado pela Divisão de Tempo de *Idle* (*Tidle*). Ao final de *Tidle*, novo ciclo recomeça-se com um nova Divisão de Tempo de *Polling* (T_{poll}) seguido por quatro Divisões de Tempo de Transmissão (T_{tx}), referentes aos dados de ED1, ED2, ED3 e ED4.

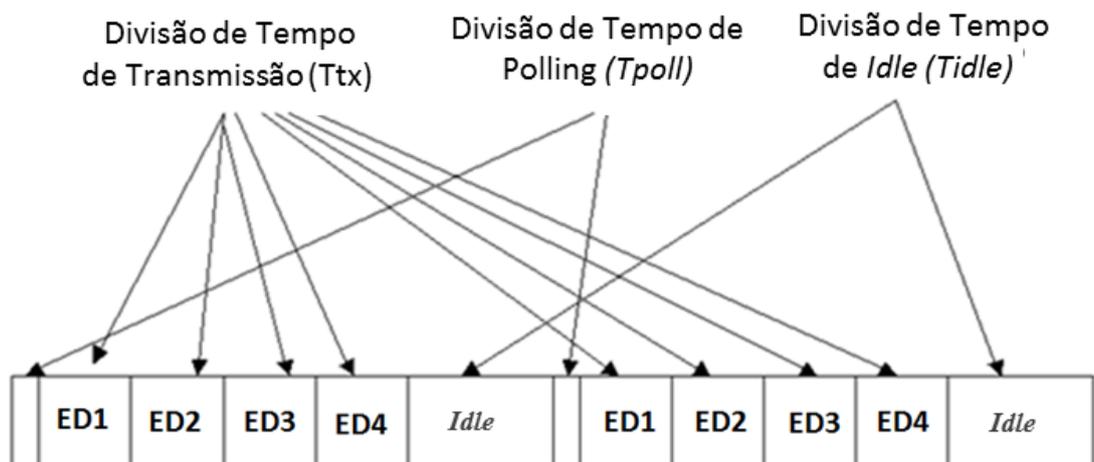


Figura 13. Sequência de Divisões de Tempo da EPH, adaptada de [10].

As figuras 12 e 13 mostram somente a situação ideal, quando todos os nós têm visada entre si e sempre têm dados a enviar. Entretanto, caso algum nó da sequência pare de responder, seja por problemas físicos (Figura 14), seja por algum problema momentâneo que cause perda de quadros, que é um problema presente nas RSSFs [36], mesmo assim, o sistema continuaria funcionando. Porque para estas situações, o RT enviaria novos *pollings* para os nós que não responderam, bem como, para os seguintes daqueles que não responderam. Nestas situações, melhor explicadas no parágrafo seguinte, o desempenho seria similar ao encontrado em [10].

A Figura 14 descreve uma situação em que o nó ED3 parou de responder por um problema físico. O ciclo inicia-se com um *polling* (POLL1) para o primeiro nó coletor de dados (ED1), que irá responder com seus dados (DATA1), o nó ED2, que está na visada de ED1, também receberá DATA1 e enviará DATA2 na sequência. Como o nó ED3 não está ativo, não dará continuidade à sequência, nesta situação o nó RT após aguardar, por um certo período de tempo, o quadro com os dados de ED3, enviará um *polling* (POLL3) para ED3, que também não receberá retorno, pois ED3 não está ativo. A ausência do quadro de dados de ED3 indica a necessidade de se enviar um *polling* (POLL4) para ED4, neste caso, como ED4 está ativo, este *polling* receberá retorno (DATA4), encerrando-se o ciclo.

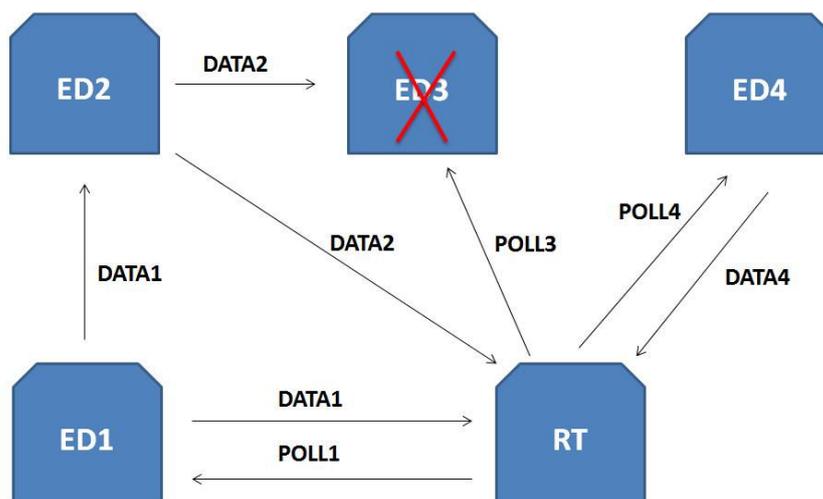


Figura 14. Exemplo de falha de sequência em uma rede com quatro EDs na EPH.

3.3. Cálculo da Energia Consumida por Ciclo de Transmissão

A implementação da EPH poderá trazer a redução do consumo da energia por ciclo de transmissão no nó RT, proporcionando o prolongamento do tempo de vida da rede. A energia consumida pelo nó RT por ciclo de transmissão, E_{PC} , pode ser expressa por:

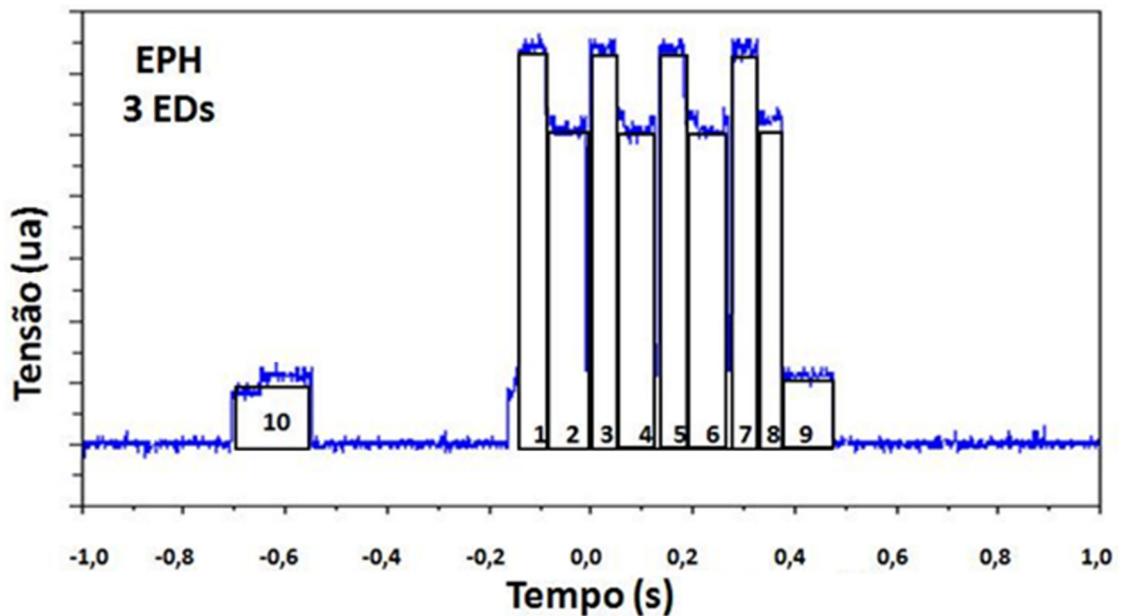
$$E_{PC} = \int_0^T V(t) I(t) dt, \quad (1)$$

com $V(t)$ e $I(t)$ sendo, respectivamente, a tensão aplicada e a corrente através do nó RT. A integração é realizada sobre o período T do ciclo de transmissão.

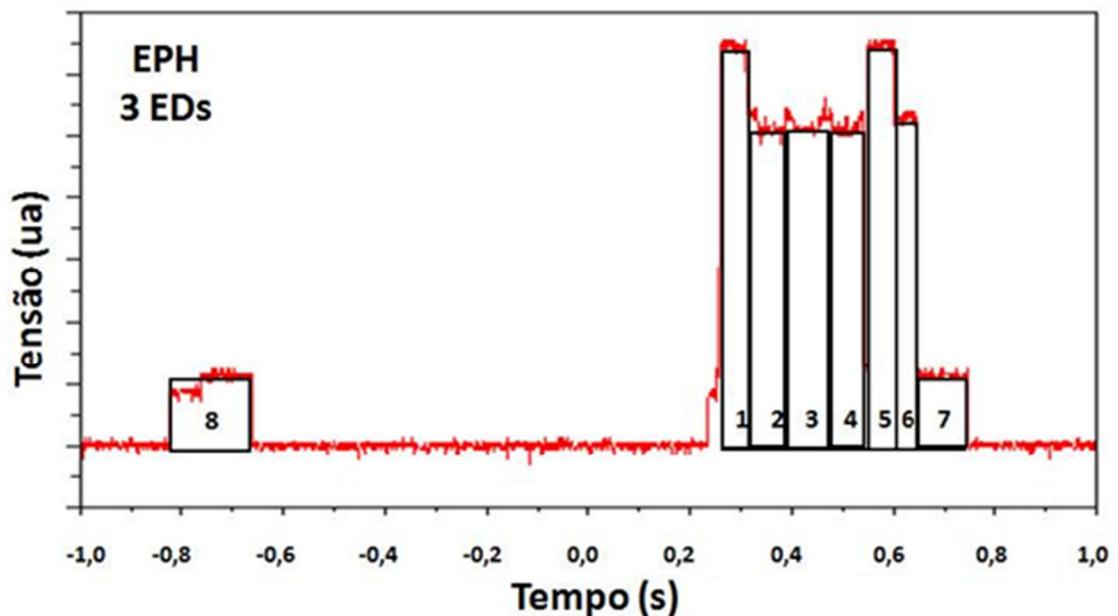
Entretanto, devido à forma de onda da tensão aplicada ao dispositivo sensor (Figs. 15(a) e 15(b)), a integral em (1) pode ser reescrita como:

$$E_{PC} = \sum_{j=1}^N V_j \cdot I_j \cdot \Delta t_j + V_d \cdot I_d \cdot T_d, \quad (2)$$

com V_j e I_j sendo, respectivamente, a tensão aplicada e a corrente através do nó RT em cada um dos intervalos de tempo indicados nas Figs. 15(a) ($\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_{10}$) e 15(b) ($\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_8$) e V_d, I_d e T_d sendo, respectivamente a tensão, a corrente e o tempo do nó RT em dormência.



(a)



(b)

Figura 15. Período de atividade para três EDs com o *polling* clássico (a) e EPH (b).

O cálculo da energia dispendida por ciclo de transmissão utilizar-se-á do valor de corrente da Tabela 2 do Anexo B e dos tempos obtidos com o auxílio de um osciloscópio que se encontram na Tabela 1 do Anexo A.

3.4. Agregação de Dados

Agregação de Dados (*Data Aggregation* – DA) é um processo que visa à redução do tráfego [37] e também proporciona economia de divisões de tempo para retransmissão dos dados recebidos dos EDs e, conseqüentemente, de energia, por meio do agrupamento de dados provenientes dos sensores.

A EPH possui uma rotina de DA [37]. Trata-se de um processo de aglomeração, sem compressão, portanto, somente se faz a concatenação dos dados dos EDs para então fazer-se a transmissão para a BC. A economia de energia no RT é resultado tanto por este ficar menos tempo ativo, como também, porque não é necessária uma transmissão para cada recepção.

Este capítulo descreveu o funcionamento da EPH e no Capítulo 4 descrever-se-á sua implementação na plataforma RADIUINO.

CAPÍTULO 4 - IMPLEMENTAÇÃO DA EPH NA PLATAFORMA RADIUINO

No capítulo 3, foi discutido o funcionamento da EPH. Neste capítulo, descreve-se sua implementação na plataforma Radiumo [38], a qual, a partir de agora, será referida simplesmente como Radiumo.

4.1. Descrição do Radiumo

O Radiumo é implementado através de um *firmware* e disponibilizado em duas versões. Uma versão com uma pilha de protocolos de cinco camadas destinada ao estudo, desenvolvimento e melhoria de funcionalidades das RSSF, que foi utilizada neste trabalho, e uma versão específica para desenvolvimento de aplicações, que não possui segmentação na pilha de protocolos [39].

O Radiumo foi criado a partir do ambiente de desenvolvimento integrado (*Integrated Development Environment – IDE*) do Arduíno que conta com uma interface [40] bastante amigável. O Radiumo é licenciado de acordo com a *GNU Library or Lesser General Public License version 2.0 (LGPLv2)* [41], que é um facilitador para o desenvolvimento de softwares em comparação às plataformas proprietárias, uma vez que permite crescimento incremental e intercâmbio de ideias.

Os módulos sensores nos quais é possível fazer a implementação do Radiumo são o BE900 [42] e o RFBee [43]. Neste trabalho, foram utilizados RFBees, que são formados pelo microcontrolador Atmega 168 [44] e pelo transceptor CC1101 [45], que foram fornecidos pelo Projeto FINEP-CEATEC-HIDRO. Este projeto tem como objetivo investigar a Bacia Hidrológica Experimental Santa Cândida e se utilizará de uma RSSF com as bibliotecas desenvolvidas neste trabalho para coleta de dados ambientais, maiores detalhes desta aplicação encontram-se no Apêndice A.

No Rádiumo, existem duas versões de biblioteca, cada uma com uma função específica na RSSF. Uma das bibliotecas é denominada BASE e a outra é a biblioteca SENSOR. A Figura 16 ilustra uma rede com dois nós, um dos quais está implementado com a biblioteca BASE e o outro com a biblioteca SENSOR.

O RFBee com o programa da BASE aliado ao computador formam o primeiro nó da plataforma Rádiumo. De agora em diante, de modo a tornar mais simples a nomenclatura, um RFBee programado com a biblioteca BASE, será designado como BASE e um RFBee programado com a biblioteca SENSOR será designado SENSOR (Figura 16).

No computador ao qual se conecta a BASE tem-se um aplicativo de nome dk101.py [38], escrito em Python, que faz parte da plataforma Rádiumo e cujas principais funções são:

2. Enviar o quadro de *polling* à BASE, para que esta o transmita para o SENSOR;
3. Receber e armazenar os dados enviados pelo SENSOR à BASE.

A função da BASE é intermediar a comunicação entre o nó SENSOR e a aplicação dk101.py. Ela (BASE) comunica-se via interface serial com o computador e via rádio com o nó SENSOR. Finalmente, o nó SENSOR receberá o *polling* enviado pela BASE, fará o devido tratamento dos dados lidos dos seus transdutores e responderá à BASE.

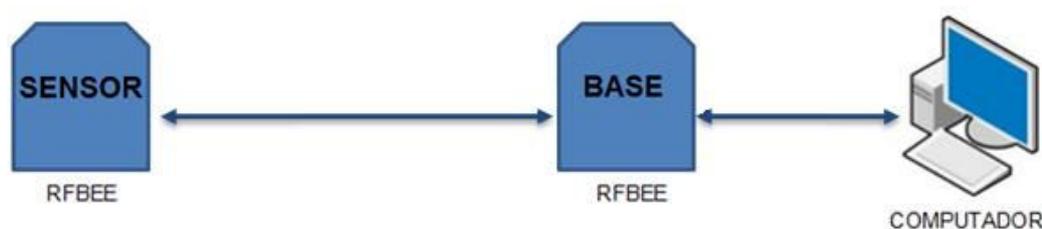


Figura 16. Especialização dos nós de acordo com a sua função na plataforma Rádiumo

4.2. Descrição da Implementação da EPH no Rádiumo

A implementação da EPH realizou-se em uma rede com vários saltos e, por isso, além de modificações nos programas originais do Rádiumo, foi necessária a criação de mais dois tipos de nós com funções específicas. Originalmente, o Rádiumo foi projetado para RSSFs com somente um salto, seja uma rede ponto-a-ponto (Figura 16) ou ponto-multiponto.

A Figura 17 ilustra uma RSSF com quatro tipos de nós, dos quais os nós Base Central (BC) e *End Devices* (ED1, ED2 e ED3) são versões modificadas de nós presentes no Radiuino e dois são nós com funcionalidades introduzidas na rede: nó roteador (RT) e nó repetidor (*Relay Node* - RN).

Na técnica de EPH, no nó denominado BC está implementada uma versão modificada da rotina da biblioteca BASE do Radiuino, de forma a permitir o recebimento de todos os quadros independentemente de os mesmos serem a ela destinados. Desta forma, se houver outra rede atuando na mesma área, é possível identificá-la e providências, tais como a mudança da rede para outro canal, poderão ser tomadas. A alteração de canal é um procedimento eficaz para evitar colisões [46].

Na biblioteca do nó SENSOR no Radiuino incluiu-se uma sub-rotina de dormência e de espera por chamada. Este nó modificado para a EPH recebe a denominação de ED. Adicionou-se, também, uma funcionalidade de modo que o mesmo possa enviar seus dados tanto por um *polling* de RT, como também, pelo recebimento da transmissão de dados do ED imediatamente anterior na sequência de EDs. De acordo com o comentário realizado na Seção 3.2, exceto pelo primeiro ED da sequência do *polling*, qualquer outro ED encaminhará seus dados ao RT, após receber o quadro com os dados do dispositivo que o antecede na sequência. Na eventualidade deste quadro não ser recebido, os dados serão coletados mediante o *polling* do RT, uma vez que houve quebra de sequência.

Uma das necessidades identificadas durante o desenvolvimento deste trabalho era a migração da função de chamada do *polling (call)* da aplicação em Python para o nó RT, pois isto permite diminuir o tráfego na rede, evitando-se que as requisições passem por vários saltos antes de atingirem os nós EDs. Observa-se também que, evitando-se os saltos, contribui-se para a economia de energia na rede.

Para poupar energia no RT, as respostas aos *pollings*, vindas dos EDs, são agregadas [37] em um único quadro, que é enviado com destino à BC, podendo ou não ser retransmitido por nós intermediários até o seu destino final.

O outro nó com função específica é o RN, que apenas recebe quadros e os retransmite. A utilização de nós repetidores apenas é necessária quando a distância entre dois nós superar o limite de alcance do rádio, que é de 50 m para

o interior de ambientes construídos ou áreas urbanas e de 120 metros para ambientes abertos em linha de visada [43].

Uma observação importante é que tanto o RT como o RN também podem ser utilizados para coleta de dados.

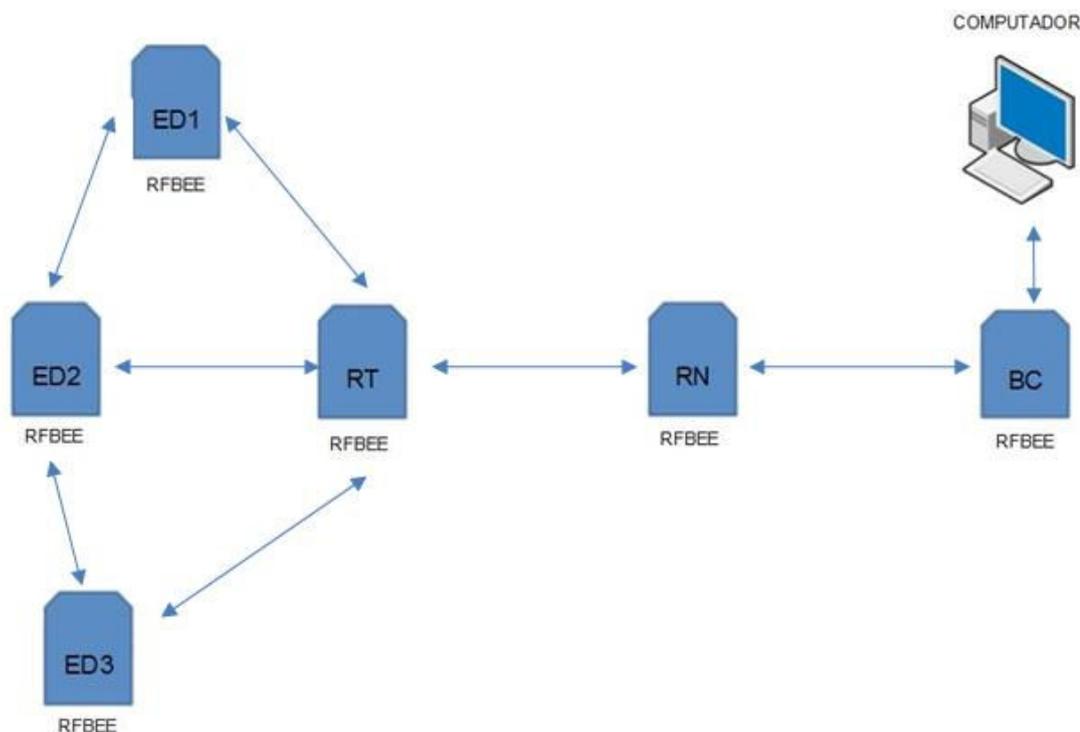


Figura 17. Exemplo de rede com os quatro diferentes tipos de nós, de acordo com a sua função na EPH.

Com a exceção da BC, que é alimentada por uma porta USB ligada a um microcomputador, todos os demais nós, por serem alimentados por baterias, fazem uso de uma sub-rotina de dormência para reduzir o consumo de energia. Isto reflete a preocupação em se desenvolver uma técnica para uma situação de aplicação na qual a alimentação cabeada ou com painéis solares é inviável, seja pelo ponto de vista técnico ou financeiro.

Em [47] estão disponíveis informações a respeito da rotina de dormência do Arduino, que foi tomada como base para a criação da sub-rotina de dormência dos nós da EPH. Destaca-se em [47] a importância dos intervalos de tempo padronizados do registrador watchdog timer (*WDT*). Este registrador marca tempos fixos a partir de 16 ms até 8 s. Portanto, qualquer outro tempo de dormência é obtido a partir da combinação dos dez tempos pré-determinados, que constam na tabela Watchdog timer prescale select da página 55 de [44]. Por

exemplo, um tempo de dormência de 1,5 s é conseguido pela soma de 1,0 s (bits 1 e 2 do *WDT* ligados) e 0,5 s (bits 0 e 2 do *WDT* ligados).

A Figura 18 mostra, com destaque em vermelho, pequenos momentos de atividade entre períodos de dormência. Conforme descrito no parágrafo anterior, um período de dormência total de 1,5 s seria o resultado da soma de dois intervalos de dormência, propiciados pela execução da sub-rotina de dormência por duas vezes, isto é, uma execução para 0,5 s de dormência seguida por mais 1,0 s de dormência. Isto acontece porque após o término do primeiro período de dormência de 0,5 s, o nó retorna a um breve período de atividade antes de entrar no segundo período de dormência. Isto pode ser monitorado com o auxílio de um osciloscópio (Figura 18). Estas duas execuções da sub-rotina de dormência são necessárias porque, conforme mencionado anteriormente, qualquer tempo de dormência tem de ser uma combinação dos tempos padronizados pelo registrador *WDT*.

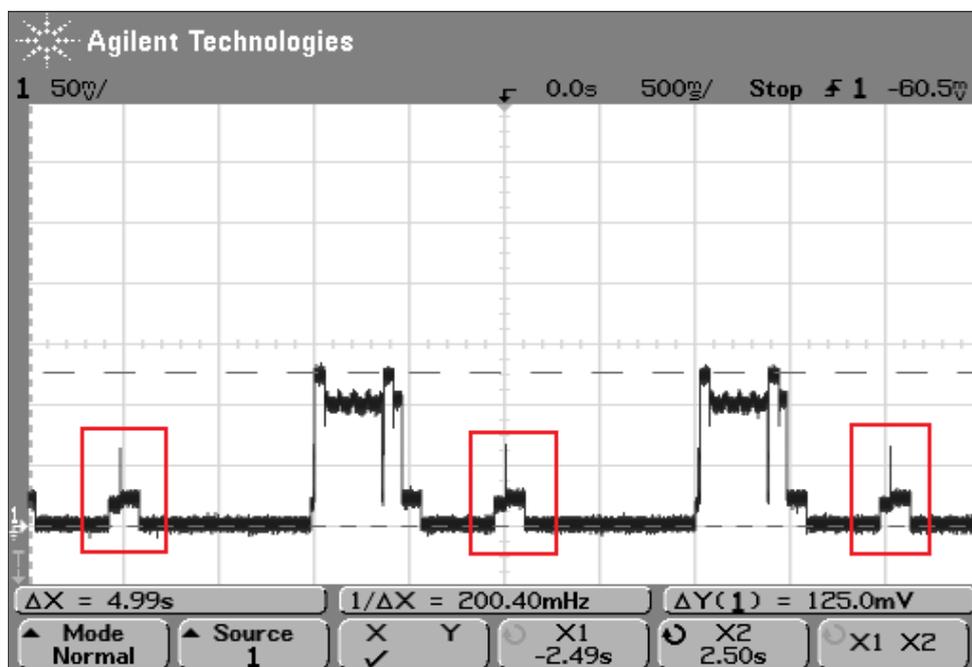


Figura 18. Ciclos de atividade em um RT com quatro EDs, com destaque em vermelho de pequenos momentos de atividade entre períodos de dormência.

4.3. Algoritmo das Rotinas de *Polling*

Conforme já mencionado, a EPH foi implementada a partir do Rádium. A descrição do funcionamento da EPH, bem como, do sistema, denominado *polling* clássico, utilizado para comparação dos resultados se fará a seguir.

4.3.1. Algoritmo da Rotina RT no *Polling* Clássico

O *Polling* Clássico ocorre da seguinte forma. Primeiramente, o nó RT verifica, sequencialmente, a disponibilidade de dados nos nós coletores (EDs) contidos em uma lista predefinida. Terminada a lista de EDs o RT agrega os dados recebidos e os envia para a BC e, em seguida, entra em dormência por um período predeterminado antes de iniciar um novo ciclo [10].

A Figura 19(a) mostra o fluxograma que descreve a rotina do *polling* clássico, enquanto, na Figura 19(b), mostram-se a trocas de mensagens entre os nós da rede, na qual as setas assinaladas com Req representam Requisições de Dados e as assinaladas com Data representam Quadros com os Dados. No início, o RT faz um *polling* (Req1) para ED1, que após encapsular a leitura do sinal elétrico codificado digitalmente de seu transdutor, retornará à RT com seus dados (Data1).

O nó RT após receber os dados de ED1 envia uma requisição (Req2) ao próximo ED da lista, que na Figura 19(a) é o ED2, enviando-lhe um *polling*. O nó ED2 assim que receber o *polling*, também, encapsulará o resultado da medição em um quadro e responderá ao RT com seus dados (DATA2). O mesmo procedimento repetir-se-á para ED3 e para todos os EDs que vierem a se incorporar à rede. Uma vez terminada a lista de EDs, o RT faz a agregação de dados e envia seu quadro a BC ou, eventualmente para um RN, caso a distância a ser vencida seja maior do que a de um salto do RFBee. O ciclo termina com uma sub-rotina de dormência. Um novo ciclo começa com a chamada da rotina *loop*, pelo firmware do RFBee.

Nota-se que no *polling* clássico, os EDs que estiverem ativos e na visada de outros EDs no momento que estes responderem ao *polling* de RT poderão sofrer com o *overhearing*, pois terão de descartar estes quadros de dados, cujo recebimento foi desnecessário. A Figura 19(b) retrata este caso para os nós ED2 e ED3, que podem receber os quadros Data1 e Data2, respectivamente, que se recebidos deverão ser descartados.

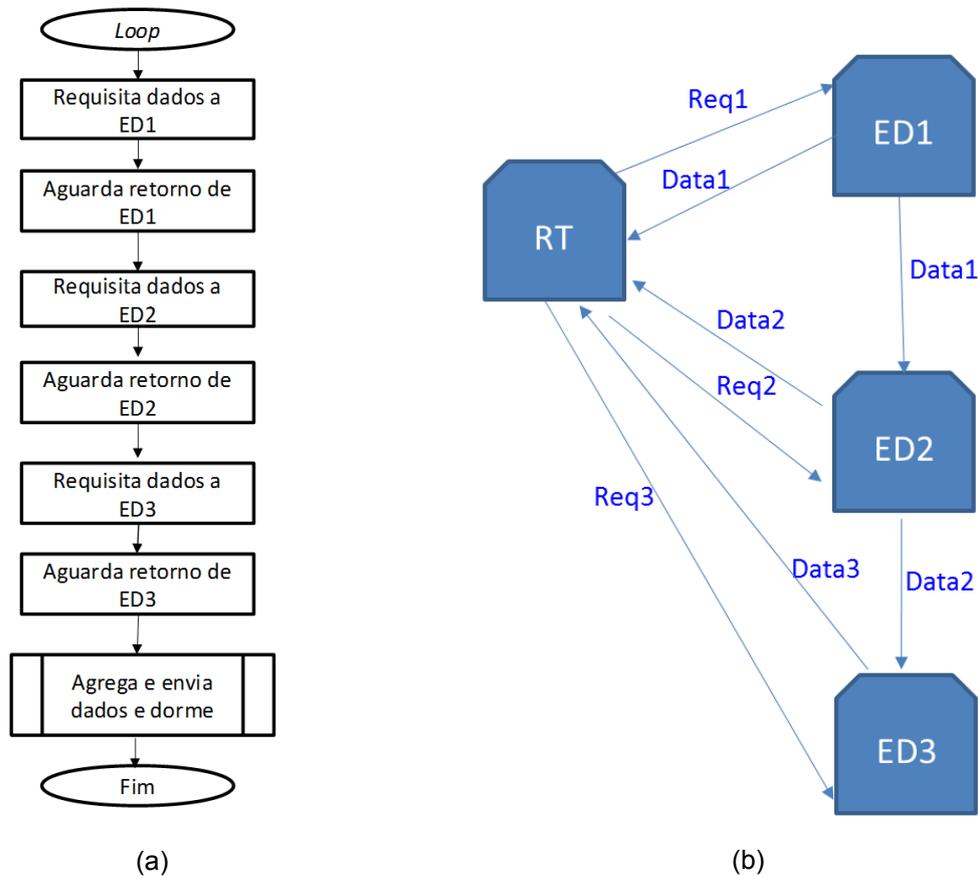


Figura 19. Implementação do *Polling* Clássico no Radiuino. (a) Fluxograma do programa do RT do *Polling* Clássico. (b) Sequência de eventos em um ciclo no *Polling* Clássico.

4.3.2. Algoritmo da Rotina RT da EPH

A Figura 20(a) mostra o fluxograma que descreve a rotina da EPH e a Figura 20(b) mostra a sequência de eventos em um ciclo da EPH, na qual as setas assinaladas com Req representam Requisições de Dados e com Data representam Quadros com os Dados. O processo inicia-se com o *polling* (Req1) do RT para o ED1. O ED1, ao receber o *polling*, encapsula o resultado da medição em seu quadro de resposta, que é, então, enviado ao RT (Data1).

O nó ED2 receberá o quadro (Data1) de resposta de ED1 para RT, que servirá como sinal para o ED2 encapsular o resultado da medição em um quadro (Data2) e enviá-lo a RT. Esta descrição refere-se às condições de funcionamento ideal do sistema, ED2 está na visada de ED1 e recebe todas as mensagens enviadas por este dispositivo, representadas pela sequência de setas em azul (Figura 20(b)). No entanto, para situações em que ED2 não tenha visada para ED1 ou ED1 não esteja em operação e, portanto, não responda ao *polling* de RT, criou-se uma sub-rotina para tratar esta falha na sequência. Esta sub-rotina, integrada ao RT, após aguardar o tempo necessário para a chegada de um quadro de ED2, caso seja ultrapassado este tempo de espera o RT envia um *polling* (Req2) para ED2. Este é o caso representado pelas setas em vermelho (Figura 20(b)).

A sequência de procedimentos descrita para o nó ED2 repete-se para ED3 e os outros EDs que sejam incorporados à rede.

No final da sequência de EDs, o nó RT faz a agregação dos dados e os envia em somente um quadro, com os dados dos três EDs para BC ou para um RN, caso não haja visada entre RT e BC. Terminado o período de dormência, que é a última tarefa da rotina *loop*, inicia-se um novo ciclo com uma nova chamada da rotina *loop* pelo *firmware* do RFBee.

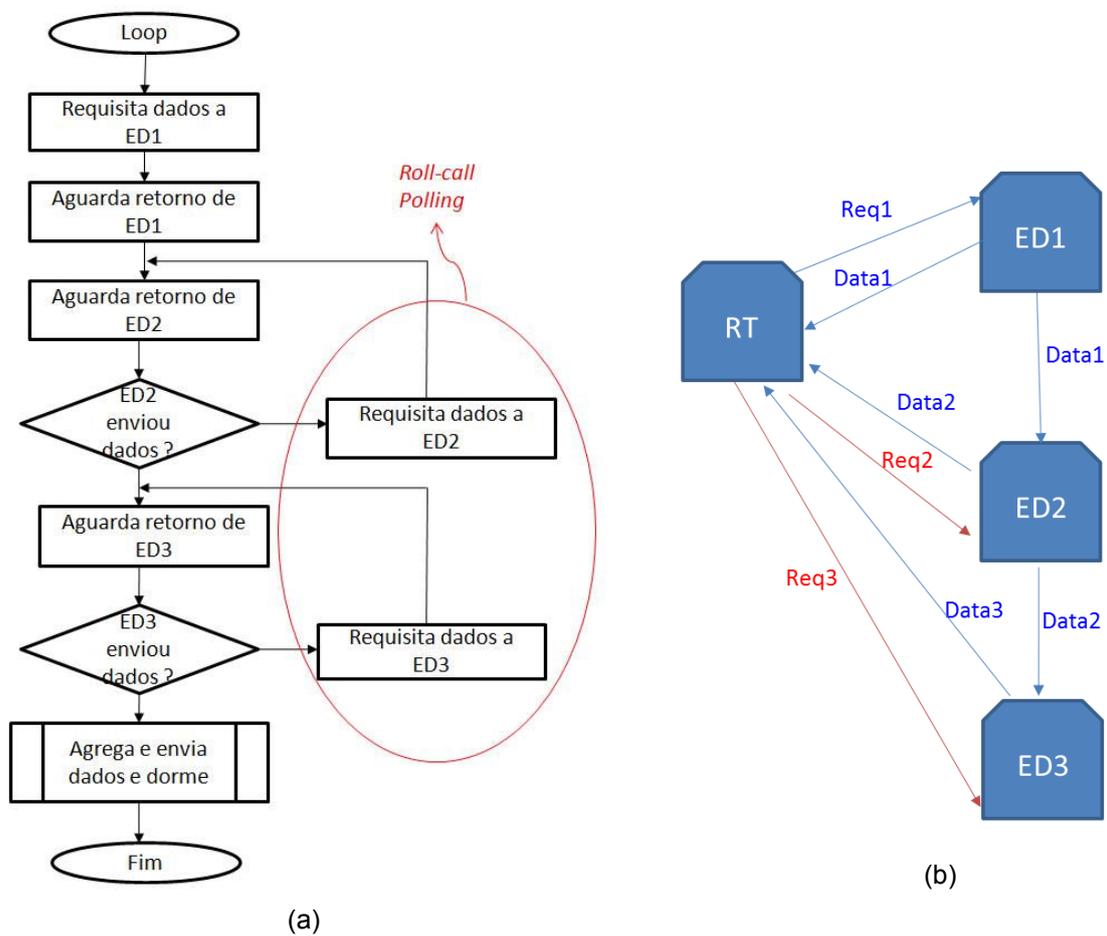


Figura 20. Implementação da EPH no Radiuino. (a) Fluxograma do programa do RT na EPH. (b) Sequência de eventos em um ciclo na EPH.

4.4. Configuração do RFBee para Mensuração da Tensão da Bateria.

Nesta seção, descrevem-se os procedimentos para a medição da tensão da bateria do RFBee, mediante um divisor de tensão, cujo consumo de energia, apesar de baixo, influencia no tempo de vida do nó RT.

O Microcontrolador ATmega 168 utiliza, por padrão de fábrica, a tensão de alimentação como valor de referência de suas medições. O inteiro 1023, definido pelo conversor analógico-digital de 10 bits, corresponde a 3,3 V (tensão de alimentação), valor máximo de medição em uma leitura analógica (*analogRead*(número do pino)).

Este procedimento de valor de referência é adotado para que as variações no valor da tensão de alimentação não influenciem nas medições. As variações no valor de tensão ocorrem, principalmente, quando a alimentação é feita por baterias, cuja tensão tende a ser decrescente ao longo do tempo. No entanto, quando o objetivo é justamente averiguar o valor da tensão de alimentação (tensão da bateria), esta medição não funcionaria, porque o valor da medição será sempre 1023, independentemente de ser este ou não o valor real de tensão de alimentação. Para contornar este problema específico de medição da tensão da bateria, existe o procedimento para alterar-se o valor de referência. Isto é feito por meio da instrução *analogReference* [48]. Para este modelo de microcontrolador, adotou-se o valor de referência 1,1 V, correspondente ao parâmetro INTERNAL1V1 ou, simplesmente, ao valor numérico 2.

Uma vez alterado o valor de referência na rotina de nome *setup*, que é uma rotina de inicialização do Radiuino, o valor máximo de leitura passa a ser 1,1 V. Portanto, para fazer-se a leitura analógica, deve-se ter o cuidado de não ultrapassar este valor de tensão de 1,1 V.

A Figura 21 ilustra um divisor de tensão para garantir que a leitura não ultrapasse este valor de 1,1 V, que é um terço de tensão de leitura padrão. O divisor de tensão montado para este fim tem um resistor de 1,2 M Ω e um de 2,2 M Ω , ambos com tolerância de 5%. Com este circuito, fez-se nova calibração, a partir da qual o resultado da leitura do transdutor analógico será multiplicado por

0,0032 V, na aplicação Python para obter-se a tensão na bateria. O resultado da multiplicação deste fator multiplicativo pelo valor medido com o conversor analógico-digital de 10 bits do Atmega 168 resultará na medição da tensão da bateria em Volts. Este fator de multiplicação não é exatamente o mesmo que o fator sem alteração do valor de referência, porque a relação entre os resistores não é exatamente um terço e também porque existem variações no valor dos resistores de $\pm 5\%$, por este motivo uma nova calibração é sempre necessária.

Estes valores de resistores foram escolhidos no intuito de ter-se um transdutor com consumo bastante baixo de corrente, pois este é um recurso escasso no sensor [21]. Por exemplo, para uma tensão de 3,3 V a corrente seria pouco superior a $0,97 \mu\text{A}$.

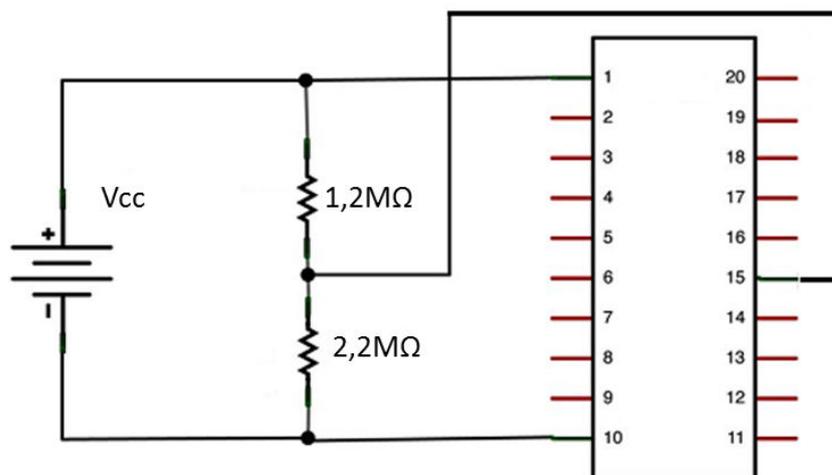


Figura 21. Divisor de tensão utilizado para possibilitar a medida da tensão da bateria, adaptada de [31]

Neste capítulo, descreveu-se a implementação da EPH na plataforma Ruidiuno e no próximo capítulo apresenta-se o sistema experimental para verificação da aplicabilidade da EPH e seu desempenho em relação ao *polling* clássico.

CAPÍTULO 5 - SISTEMA EXPERIMENTAL

Em capítulos anteriores, descreveu-se a EPH e a sua implementação na Plataforma Radiuino. Neste capítulo, descreve-se o sistema experimental empregado para a validação da técnica proposta nesta dissertação.

5.1. Sistema Experimental para medições em ambientes fechados

Na montagem do sistema experimental, utilizou-se de sensores RFBee v.1.1 [43]. A Figura 22 ilustra o esquemático referente ao experimento realizado em ambiente fechado, durante o qual foram empregados cinco RFBees, sendo três funcionando como EDs, um como RT e, finalmente, um como BC. Observa-se que este último está conectado a um computador mediante uma interface serial.

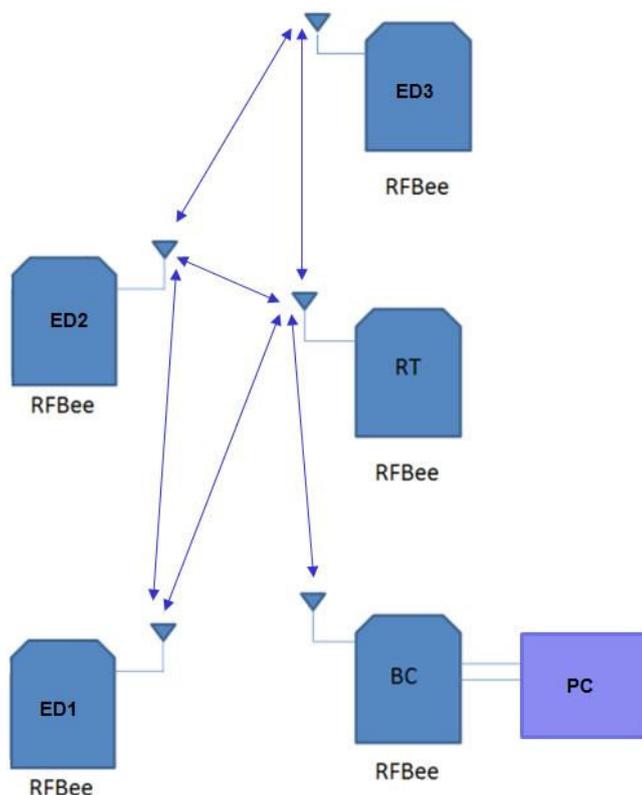


Figura 22. Esquemático utilizado para os testes em ambiente fechado

A alimentação do RT foi composta por duas pilhas AAA-recarregáveis de 900 mAh (Figura 23) e para os EDs foram utilizadas duas pilhas AA-recarregáveis de 2500 mAh. O tempo de recarga neste experimento foi de, no mínimo, 15 horas para pilhas AAA e de 16 horas para as pilhas AA, conforme especificado no rótulo das mesmas. A escolha de pilhas de menor capacidade de carga para o RT deveu-se a necessidade de se diminuir o tempo de duração do experimento, que é determinado pelo esgotamento da carga das baterias [49].

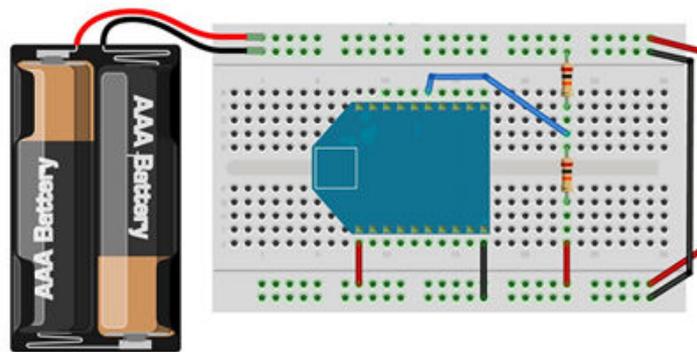


Figura 23. Componentes do nó roteador, figura adaptada de [31].

Neste experimento todos os nós estão em modo de recepção durante o período de *idle* [50].

Foram captados e utilizados como dados, nestes testes, a tensão da bateria e o Indicador de Intensidade de Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indication* - RSSI) [51].

A Figura 24 mostra a planta do local do experimento, que foi realizado em ambiente residencial fechado e sem controle de temperatura [49], sendo ED1 em vermelho, ED2 em bege, ED3 em laranja, RT em verde e BC em preto.

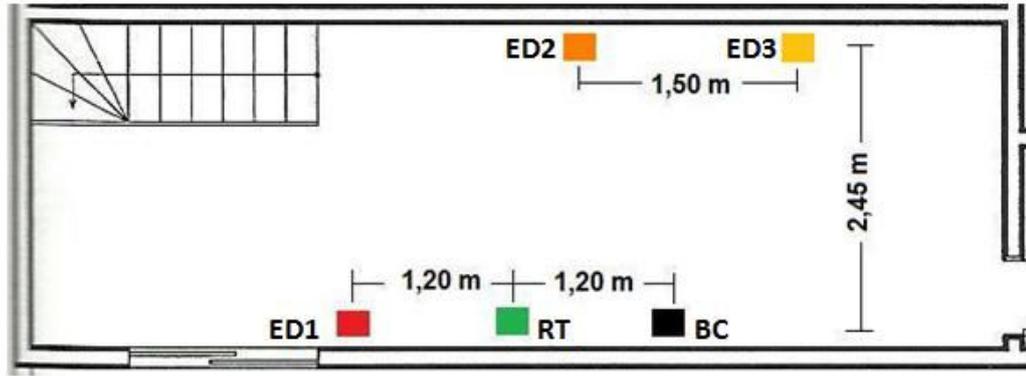


Figura 24. Planta do local do experimento.

Os rádios foram configurados para trabalhar na potência máxima de 10 dBm e à frequência de 915 MHz.

Na comparação de resultados entre a EPH e o *polling* clássico todos os EDs sempre terão dados para transmitir e se supõe que não existirá falha na sequência de EDs, por problemas de visada, isto é, todos os EDs têm visada para o seu antecessor e para o seu sucessor no *polling*. Portanto, neste teste comparativo, a EPH somente irá recorrer ao *roll-call polling* nos casos de falha de sequência devido a eventuais perdas de quadros dos EDs [36].

O mesmo tempo total de 1,5 s de dormência no RT foi adotado para ambos os testes de desempenho da EPH e o *polling* clássico. As Figuras 25 e 26 ilustram as divisões de tempo do RT, respectivamente para o *polling* clássico e para a EPH, das quais as de menor largura são os quadros de *polling*, as assinaladas como ED1, ED2 e ED3 são oriundas, respectivamente, dos sensores ED1, ED2 e ED3 e as assinaladas como *Idle* são as divisões de tempo de dormência.

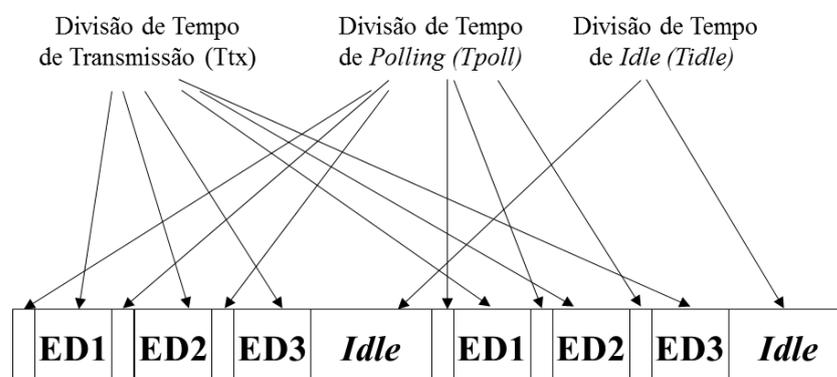


Figura 25. Ciclos de transmissão de um *polling* clássico, adaptada de [10].

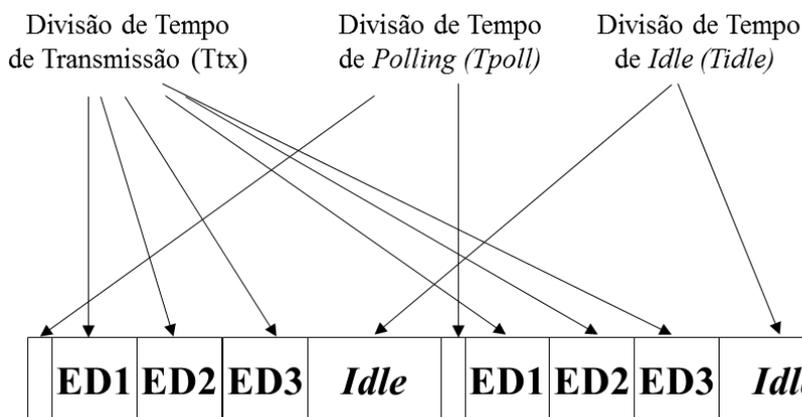


Figura 26. Ciclos de transmissão da EPH, adaptada de [10].

Para a estimativa da energia dispendida por ciclo de transmissão pelo nó RT, utilizou-se um osciloscópio de Marca Agilent Modelo 54621A [52] (Figura 27) para mensurar a tensão aplicada ao RFBee que funciona como nó RT. A intensidade de corrente foi medida de forma indireta mediante o uso de um resistor de $5\ \Omega$ em série com o RFBee.

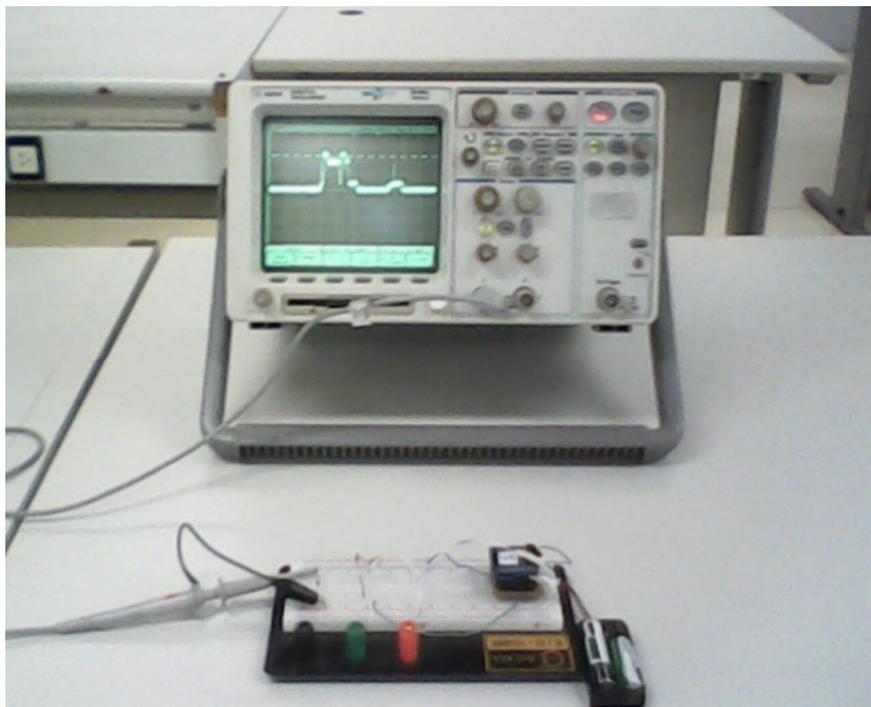


Figura 27. Foto do instrumental utilizado para captura de dados de tensão e tempo de duração dos períodos de atividade do sensor.

Este capítulo descreveu os procedimentos adotados para a realização dos experimentos em ambiente fechado. No Capítulo 6, apresentam-se os resultados dos referidos experimentos.

CAPÍTULO 6 – RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos na coleta de dados em RSSFs em ambiente fechado, comparando-se, especificamente, o desempenho do *polling* clássico e da EPH.

6.1. Atividade dos Nós Roteadores por Ciclo de Transmissão: EPH versus *Polling* Clássico

Medindo-se, com o auxílio de um osciloscópio, a tensão aplicada a um nó RT, obteve-se os resultados que são apresentados na Fig. 28, com a EPH em vermelho, o *polling* clássico em azul e a diferença entre os mesmos em amarelo. Pode-se constatar que, de acordo com a proposta discutida nos Capítulos 3 e 4, a implementação da EPH permitiu uma redução significativa dos períodos de atividade no nó RT, quando comparada aos períodos de atividade da técnica de *polling* clássico. Devido as incertezas geradas pelas medições dos períodos de atividade pelo osciloscópio [52] serem muito baixas, as barras de erros não são visíveis no gráfico da Fig. 28.

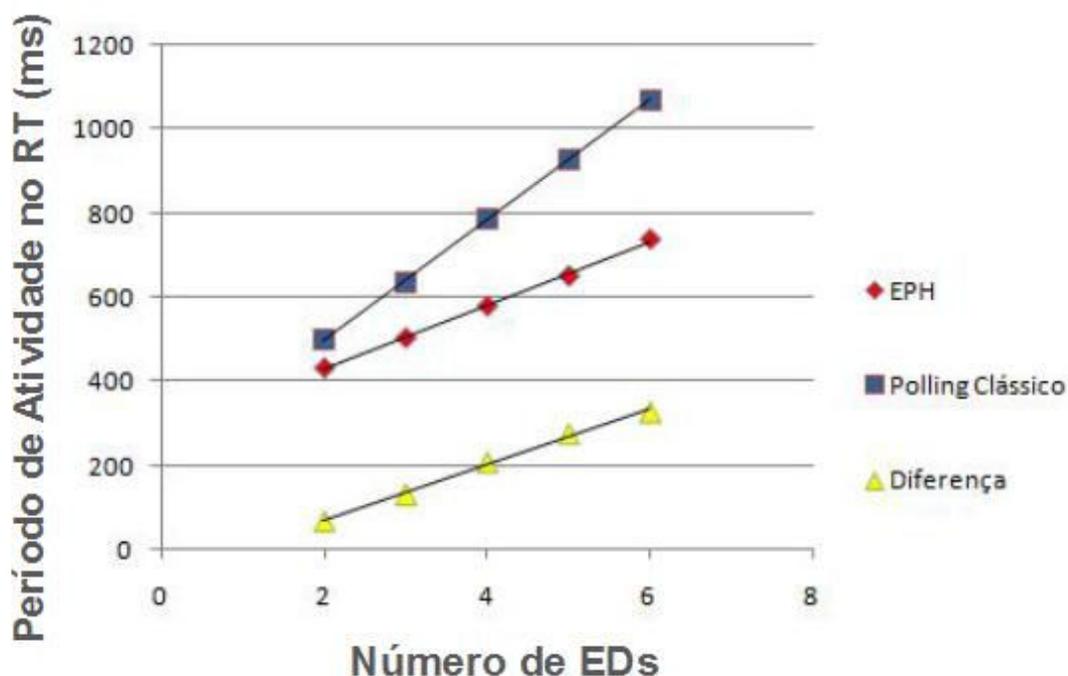


Figura 28. Evolução do período de atividade no nó RT, conforme cresce a quantidade de EDs.

Conforme pode ser constatado ao se inspecionar a Figura 28, a diferença entre os períodos de atividade dos nós RTs torna-se mais significativa, conforme se aumenta o número de EDs e pode ser quantificada pela inclinação da reta em amarelo, sendo de cerca de 65,6 ms por nó coletor (65,6 ms/ED).

O intervalo de 65,6 ms é o tempo necessário para o RT processar e enviar o quadro de *polling*. Isto pode ser constatado a partir da Fig. 29, que mostra a atividade em um RT para coletar e enviar a informação de seis EDs, que operam de acordo com o *polling* clássico.

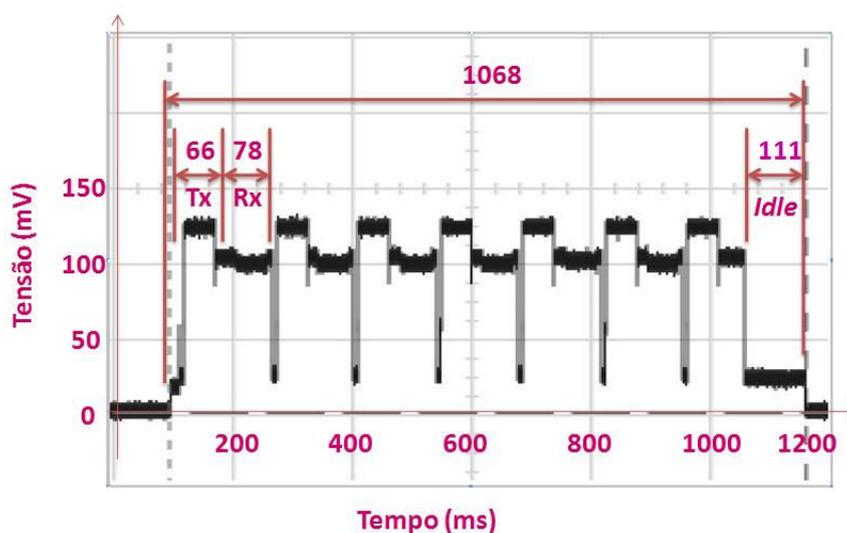


Figura 29. Duração dos tempos de atividade do sensor para transmissão, recepção e ocioso (*idle*).

A Figura 30 mostra um ciclo com três EDs na EPH capturado por um osciloscópio, onde, destaca-se, em um retângulo vermelho, o tempo que o transceptor utiliza para a transmissão de um *polling* pelo nó RT, que, neste caso, foi de 56 ms. O tempo de transmissão de 65,6 ms é maior que o tempo utilizado pelo transceptor para transmitir o quadro de *polling*, porque para o envio deste quadro também existem outros tempos adicionais, como processamento, transição de estado, entre outros.

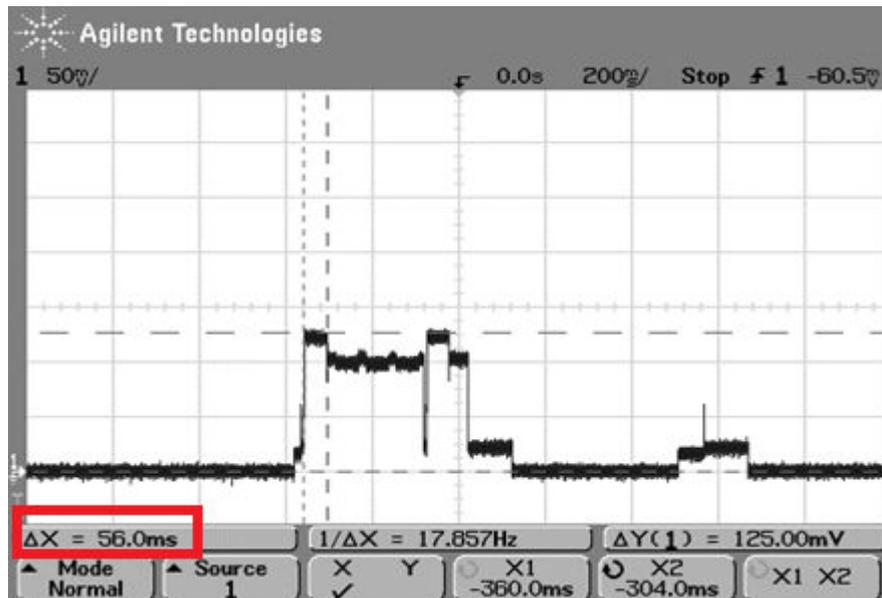
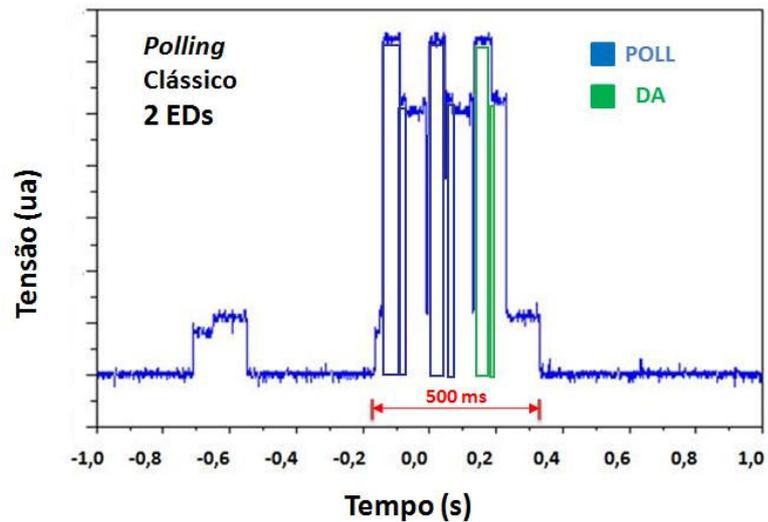
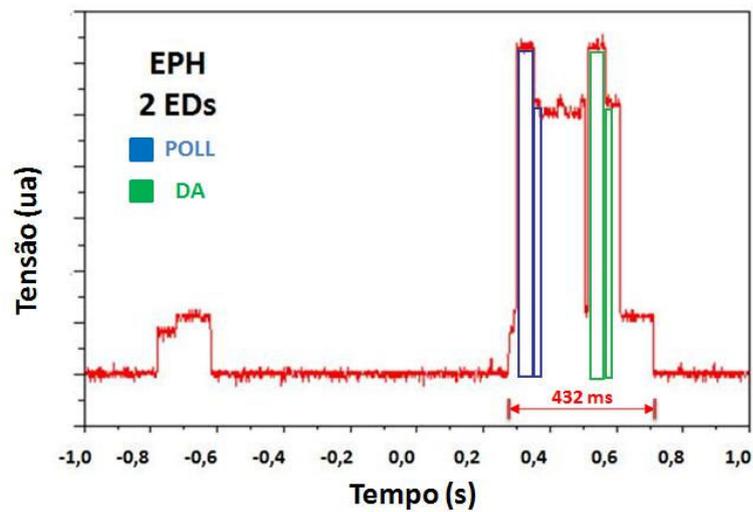


Figura 30. Ciclo de atividade do nó RT com três EDs na EPH, destaque para o tempo necessário para envio de um quadro de *polling*.

Na Figura 31, compara-se os períodos de atividade para uma RSSFs com dois EDs para o *polling* clássico (Fig. 31(a)) e a EPH (Fig. 31(b)). Os retângulos de cor azul são os quadros de *pollings* (POLL) e os em verde são os quadros com dados agregados (DA) enviados à BC. A existência de um quadro de *polling* a menos na EPH (Figura 31(b)) deve-se à utilização do quadro de dados do primeiro ED da sequência como sinal para o segundo ED da sequência enviar seus dados, ou seja, na EPH o RT somente precisa enviar o *polling* ao primeiro ED da sequência. Esta ausência de um quadro em relação ao *polling* clássico (Figura 31(a)) é que confere ao RT operando de acordo com a EPH um menor tempo de atividade e, conseqüentemente, um menor consumo de energia, o que acarretará um maior tempo de vida ao mesmo.



(a)



(b)

Figura 31. Período de atividade para 2 EDs. (a) *Polling* Clássico. (b) EPH

Na Figura 31 tem-se o tempo do período de atividade do RT destacado pelas cotas, em vermelho, por meio das quais se obtém o valor da diferença de tempo entre ambas as técnicas, que neste caso foi de 68 ms para uma rede com 2 EDs. Esta diferença aumenta, conforme mencionado anteriormente, na proporção média de 65,6 ms para cada novo ED adicionado à rede.

6.2. Estimativa da Energia Dispendida por Ciclo de Transmissão no nó RT

A partir da equação (2) e de medições de tensão e corrente através de um nó RT, obteve-se o gráfico mostrado na Fig. 32, que mostra a estimativa da energia dispendida por ciclo de transmissão no nó RT. Em azul, apresenta-se a curva do *polling* clássico, em vermelho da EPH e em amarelo da diferença entre ambas. Inspeccionando-se este gráfico, nota-se que a superioridade em termos de eficiência energética da EPH torna-se mais significativa conforme se aumenta o número de dispositivos coletores ED. A inclinação da curva em amarelo indica que o consumo da técnica clássica é maior cerca de 3,81 mJ por dispositivo coletor (3,81 mJ/ED). Tal comportamento é esperado, em vista da supressão dos quadros de *polling* a partir do segundo ED da sequência, o que não acontece com técnica de *polling* clássico. As barras de erro refletem a influência da variação da tensão, desde o início do experimento até a tensão de corte, no cálculo da energia. A tensão de corte, neste experimento, é a tensão média menos um desvio padrão.

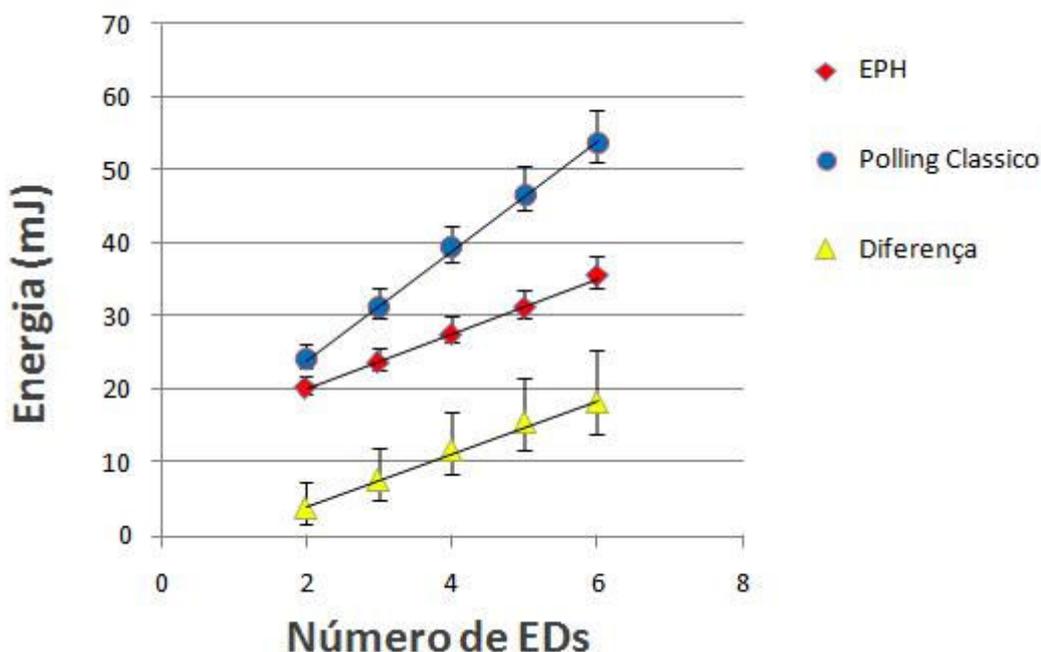


Figura 32. Energia consumida por ciclo de transmissão no nó RT em função do número de EDs.

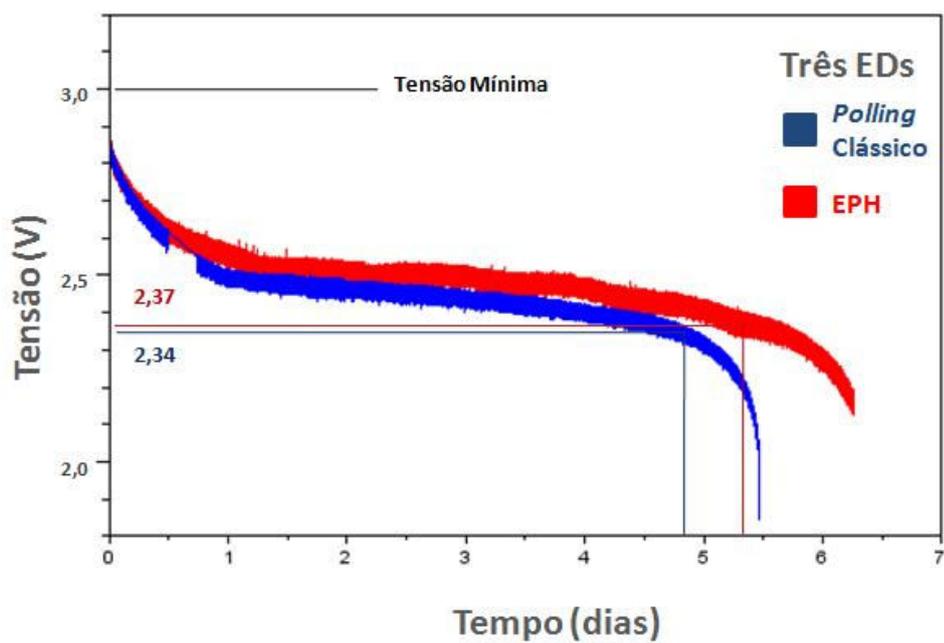
6.3. Tempo de vida do nó RT

Nesta seção, compara-se o tempo de vida de nós roteadores que operam, um de acordo com a técnica do *polling* clássico e, o outro, com a EPH. As Figuras 33(a) e 33(b) exibem a tensão em Volts em função do tempo de operação em dias do experimento com o *polling* clássico, em azul, e, em vermelho, com a técnica de EPH. O experimento foi realizado utilizando-se de três (Fig.33(a)) e quatro (Fig. 33(b)) nós coletores. Este experimento não foi realizado com somente dois nós coletores, porque a pequena diferença entre o tempo de vida de ambas as técnicas, neste caso, poderia ficar dentro da margem de variação do tempo de descarga das baterias e, como, a diferença entre as técnicas tende a ser maior conforme cresce o tamanho da rede, os testes começaram já com três EDs, com o objetivo de evidenciar-se a superioridade da EPH.

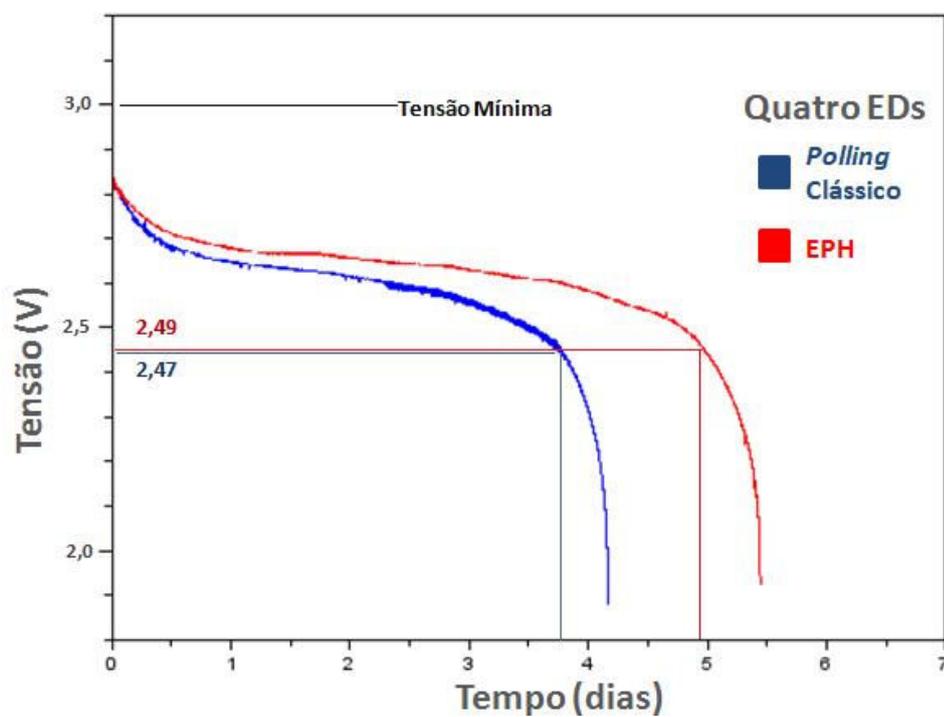
Para apuração do tempo de vida e quantidade de quadros transmitidos, considerou-se o valor da tensão média menos um desvio padrão como ponto de corte, vide gráficos da Figura 33, a partir do qual, as amostras que se seguiram, foram desconsideradas, porque se acredita que este seria o momento ideal para efetuar-se a troca das baterias, evitando-se que se chegasse a tensões muito abaixo da tensão mínima especificada pelo fabricante [43].

No experimento em uma rede com três EDs, no *polling* clássico, a bateria atingiu o valor de corte de 2,34 V, com quase cinco dias de funcionamento, enquanto que na EPH, o valor de corte de 2,37 V foi atingido com quase cinco dias e meio de funcionamento (Figura 33(a)). No experimento em uma rede com quatro EDs, no *polling* clássico, o nó RT manteve-se em funcionamento por pouco mais de três dias e meio e de quase cinco dias para a EPH (Figura 33(b)) até atingirem o valor de corte de 2,47 e 2,49 V, respectivamente.

A EPH apresentou um aumento no tempo de vida do nó roteador, e conseqüentemente da rede, de 12,14% em relação ao *polling* clássico para a rede com três EDs e de 32,14% para a rede com quatro EDs. Desta forma, para esta rede com três EDs o aumento do tempo de vida do nó RT foi inferior ao experimento com quatro EDs. Conforme descrito na seção anterior, a diferença de energia dispendida por ciclo aumenta conforme aumenta o número de EDs na rede, e isto se reflete no tempo de vida da rede.



(a)



(b)

Figura 33. Medição da tensão na bateria do RFBee em função do tempo. Em (a) RSSF com três EDs e em (b) RSSF com quatro EDs.

Em relação à quantidade de quadros transmitidos, também houve um aumento da diferença de desempenho com o aumento da quantidade de três para quatro EDs na rede.

A Figura 34 mostra a quantidade de quadros transmitidos utilizando-se de cada uma das técnicas. Nota-se que a EPH (barras vermelhas), tanto para três como para quatro EDs viabiliza a transmissão de uma quantidade maior de quadros à BC com relação à técnica de *polling* clássico (barras azuis).

No experimento com três EDs o número de quadros transmitidos é maior que no experimento com quatro EDs. Isto ocorre devido ao maior consumo de energia por ciclo, o que acarreta tempos de vida de RT menores do que os encontrados nos experimentos com três EDs. Observa-se, também, que a diferença entre as técnicas é mais acentuada no experimento com quatro EDs, confirmando um melhor desempenho da EPH com o crescimento da rede.

No *polling* clássico, para 3 EDs, foram transmitidos 189.117 quadros à BC, até atingir-se a tensão de corte, já na EPH foram transmitidos 238.947 quadros. Desta forma, a EPH superou em 26,35% o *polling* clássico. No experimento com 4 EDs, a EPH transmitiu 205.867 quadros à BC, enquanto que o *polling* clássico transmitiu 142.179 quadros. Com isto, a EPH superou o *polling* clássico em 44,79% para uma rede com quatro EDs.

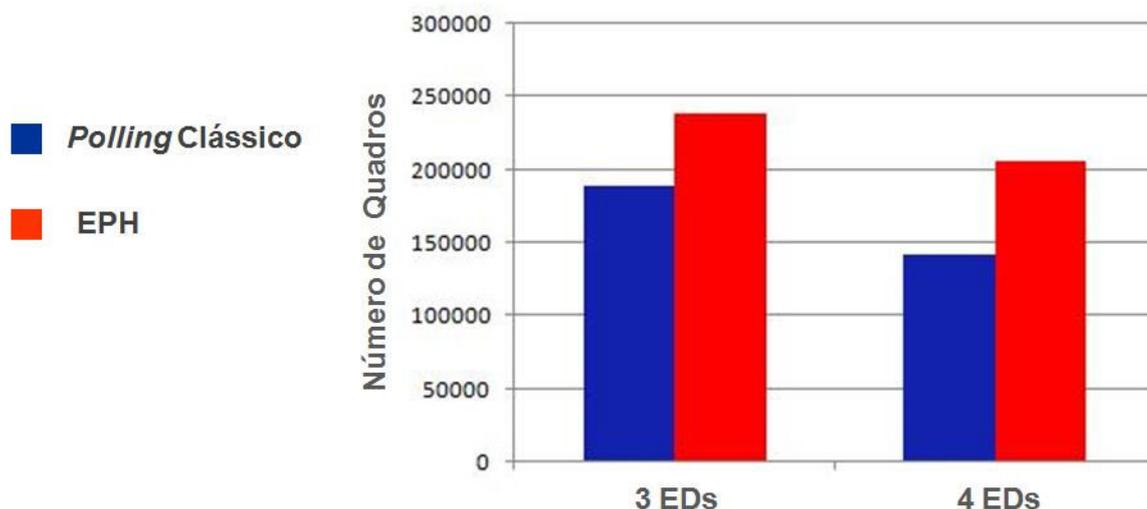


Figura 34. Quantidade de quadros transmitidos pelo RT à BC em experimentos com três e quatro EDs.

Quando se comparam os dois resultados, o aumento percentual para a quantidade de quadros transmitidos é maior do que para o tempo de vida do nó RT, porque na EPH a duração do ciclo é menor que na técnica de *polling* clássico. Consequentemente, um número maior de quadros serão transmitidos pelo nó RT, não somente devido a maior sobrevida do mesmo na EPH, como também, porque este ciclo menor possibilita uma quantidade maior de transmissões por hora em relação ao *polling* clássico.

Por exemplo, o ciclo de atividade para quatro EDs para o *polling* clássico é de aproximadamente 0,79 s, que, acrescido a 1,50 s de dormência, resulta em um tempo total de cerca de 2,29 s. Por outro lado, para a EPH o ciclo de atividade para os mesmos quatro EDs é em torno de 0,58 s, que, com os 1,50 s de dormência, resulta em um tempo total de cerca de 2,08 s. Desta forma, durante uma hora com o *polling* clássico serão transmitidos à BC aproximadamente 1.573 quadros. Por sua vez, utilizando-se da EPH serão transmitidos à BC aproximadamente 1.730 quadros. Contudo ambas as formas de mensuração indicam melhora considerável da EPH em relação ao *polling* clássico, sobretudo com o crescimento do número de EDs.

A Figura 35 mostra o número de quadros transmitidos no experimento com quatro EDs, na qual, os quadros do nó RT estão divididos entre quadros de *polling*, em azul, e dados agregados enviados à BC, em verde e os nós coletores de dados ED1, ED2, ED3 e ED4 estão representados pelas colunas de cores vermelha, marrom, bege e amarela, respectivamente. Na EPH foram transmitidos cerca de 205.000 quadros pelos nós coletores de dados, bem como, pelos quadros de dados agregados enviados pelo nó RT à BC, já no *polling* clássico, transmitiu-se cerca de 142.000 quadros por estes mesmos EDs ao nó RT e, também, pelo nó RT à BC. Ainda na Figura 35, nota-se uma quantidade muito maior de quadros de *pollings* enviados pelo *polling* clássico em comparação com a EPH, esta diferença de quadros a maior é que provoca um consumo maior de energia, por ciclo, no *polling* clássico e resulta em seu tempo menor de vida em relação à EPH.

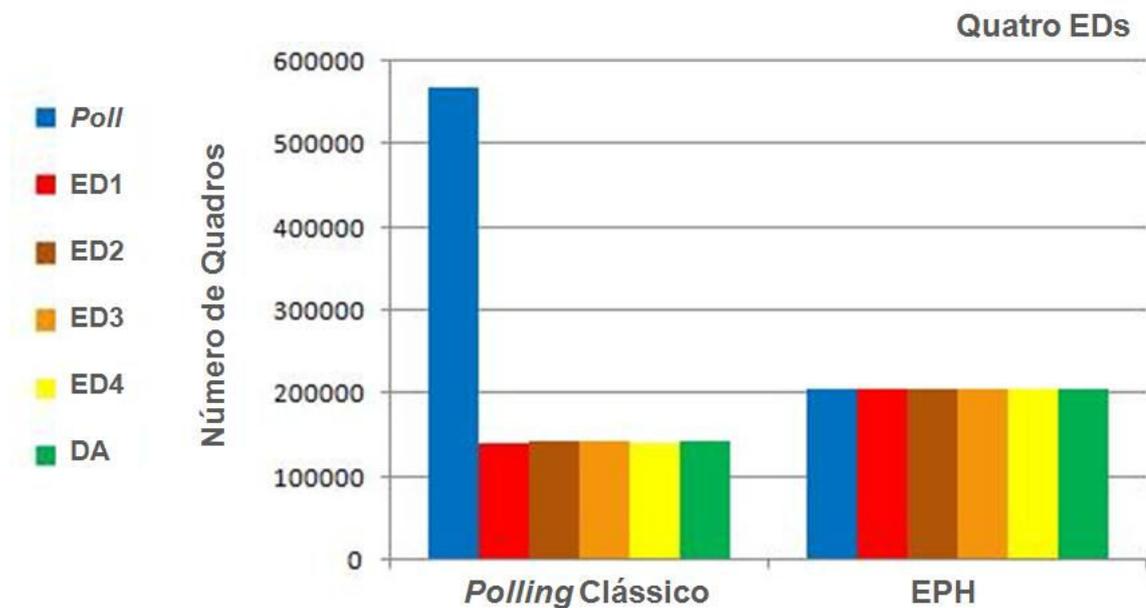


Figura 35. Número de quadros transmitidos para uma rede com quatro EDs para a EPH e o *polling* clássico.

A Figura 36 mostra o percentual de quadros perdidos durante todo o período de operação para ambas as técnicas, isto é, os quadros que foram enviados pelo RT e não recebidos por BC em uma rede com quatro EDs; sendo a EPH em vermelho e o *polling* clássico em azul. No início, houve um pico de quadros perdidos tanto para a EPH como para o *polling* clássico. Após certo volume de quadros transmitidos, os índices permaneceram estáveis, em cerca de 0,09% para a EPH e 0,05% para o *polling* clássico. Demonstrando desempenho superior do *polling* clássico em relação à EPH de 0,04%, neste experimento. Sabe-se que para sistemas de comunicação via rádio perdas de quadros são inevitáveis [36], no entanto, não se encontrou estatística de perda de quadros para este dispositivo (RFBee) [43], portanto, não foi possível fazer uma avaliação qualitativa sobre este quesito.

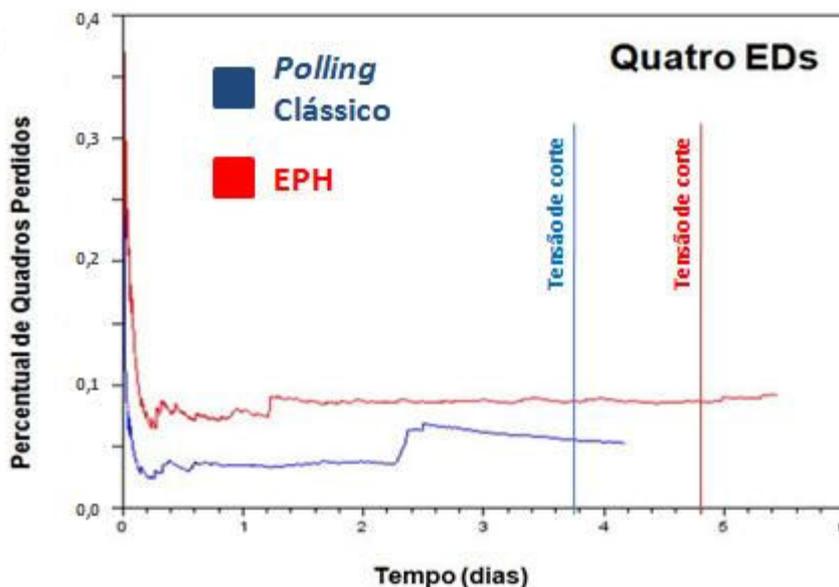


Figura 36. Percentual de quadros perdidos para a EPH e para o *polling* clássico em uma rede com quatro EDs.

6.4. Avaliação da EPH e do *Polling* Clássico mediante a RSSI

Conforme descrito no Capítulo 5, quando da descrição do Sistema Experimental, os testes realizados para a avaliação do prolongamento do tempo de vida do nó RT se estenderam ao longo de dias. Salienta-se que o nó RT foi alimentado por duas pilhas ligadas em série, procedimento também descrito em [49].

A Figura 37 mostra a distribuição dos quadros de acordo com a RSSI para a EPH (37(a)) e *polling* clássico (37(b)). A média desta distribuição ficou próxima de -60 dBm, para ambas as técnicas, que é um valor típico deste indicador para RSSF. Isto demonstra que, apesar de a maior parte do experimento ter sido realizado com tensão abaixo da especificada pelo fabricante [43], que é de 3,0V, a comunicação não foi significativamente prejudicada, para este experimento realizado em ambiente fechado.

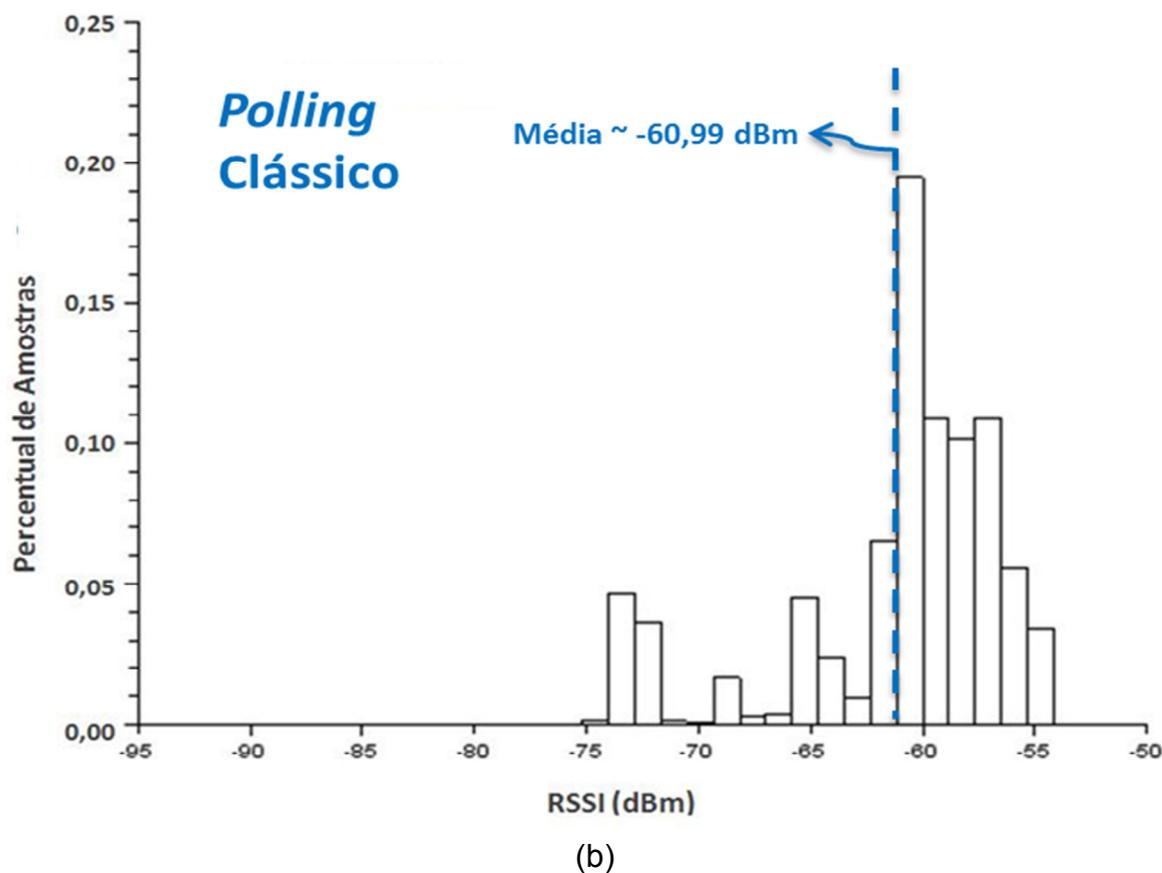
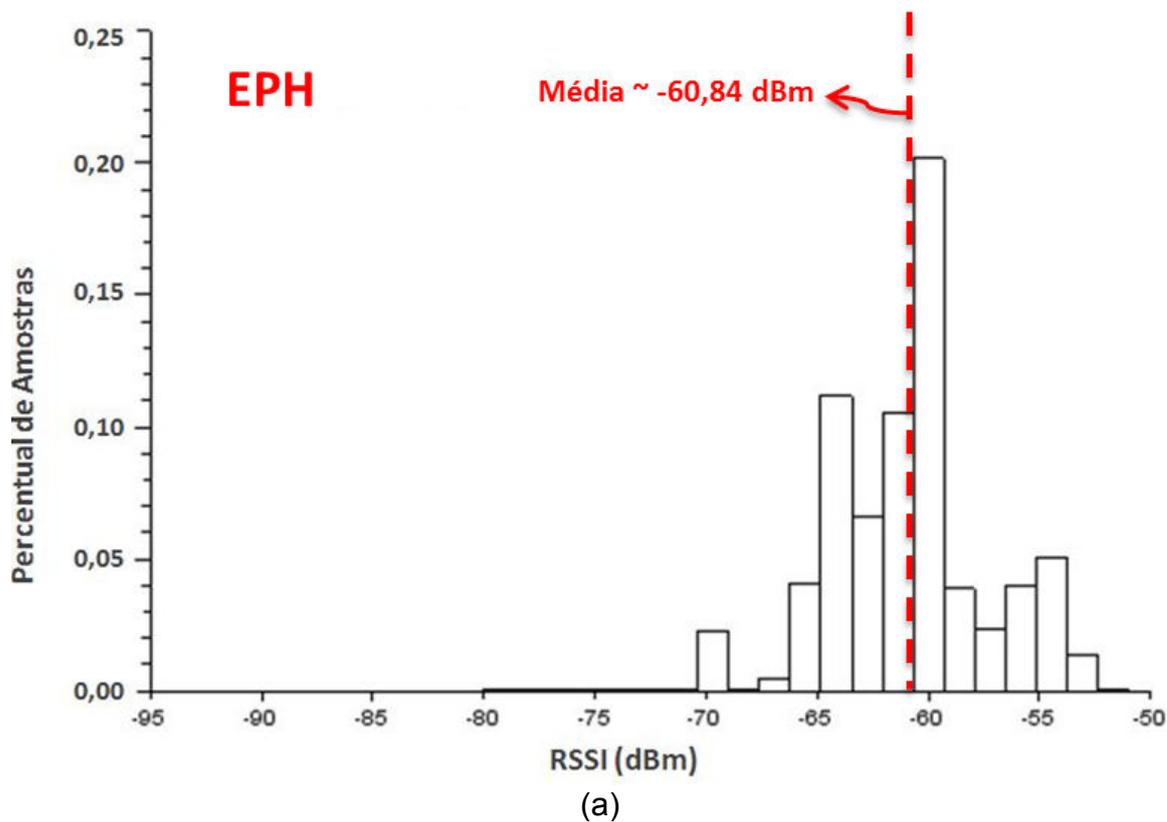
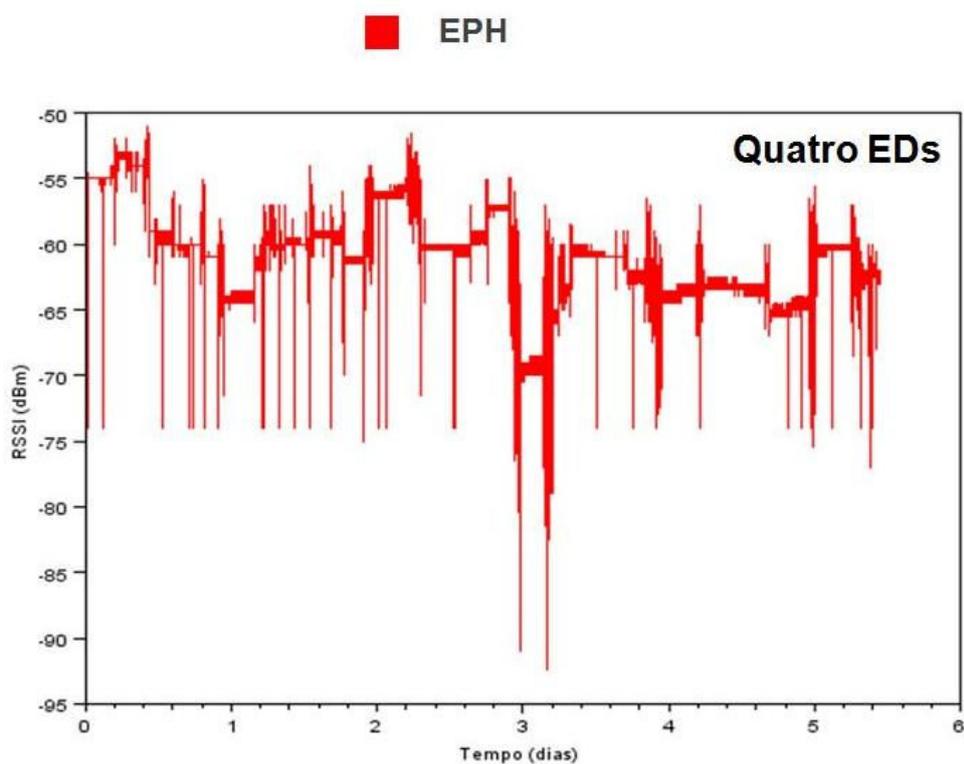


Figura 37. Distribuição dos quadros segundo a medida de RSSI (a) para a EPH e (b) para o *polling* clássico.

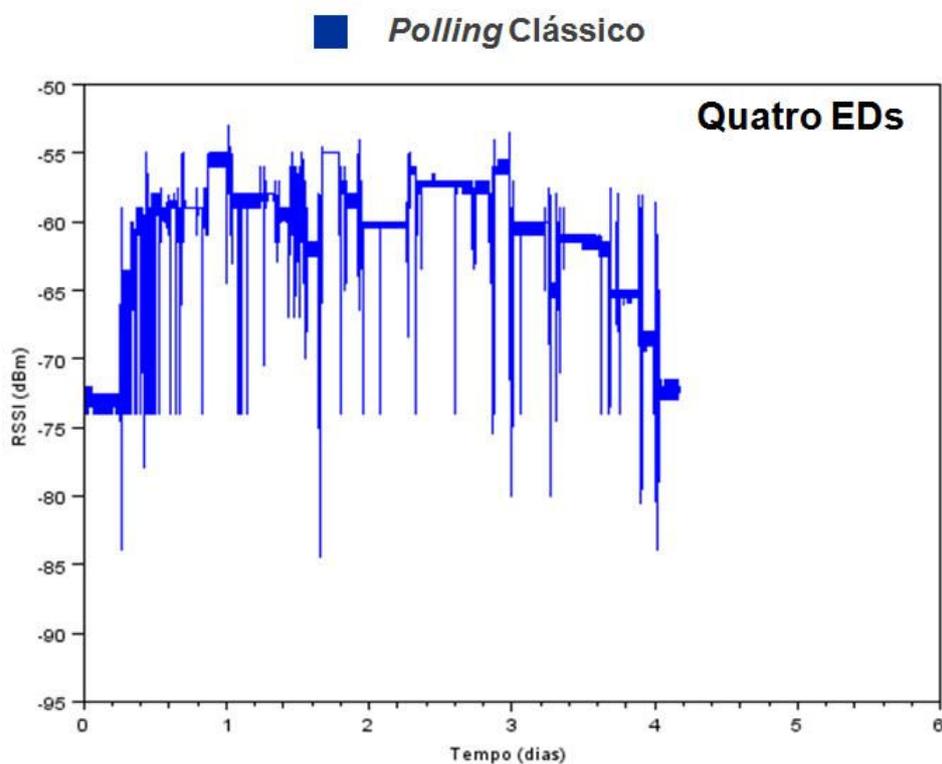
A Figura 38 mostra o gráfico dos valores de RSSI em função do tempo, para ambas as técnicas para uma rede com quatro EDs. A Figura 38(a) refere-se à EPH e a Figura 38(b) refere-se ao *polling* clássico, tanto para a EPH como para o *polling* clássico, a grande maioria das amostras foram recebidas com RSSI superior a -75 dBm, valor bem superior ao da sensibilidade do transceptor CC1101 [45], que é de cerca de -100 dBm.

A Figura 39 exibe o gráfico do RSSI em função da tensão, para ambas as técnicas para uma rede com quatro EDs. A Figuras 39(a) refere-se à EPH e a Figura 39(b) refere-se ao *polling* clássico.

A Figura 39 mostra que, para tensões abaixo de 2,5 V, o RSSI sofre influência da queda de tensão. No *polling* clássico, para tensões abaixo de 2,5 V, o RSSI raramente supera -65 dBm, enquanto que na EPH este patamar ficou em torno de -60 dBm. Acredita-se que a EPH apresente melhor desempenho deste indicador em relação ao *polling* clássico, devido ao maior estresse pelo qual passa a bateria no *polling* clássico, em cada ciclo de atividade, e que para tensões abaixo de 2,5 V, este estresse afete mais significativamente o RSSI no *polling* clássico que na EPH.

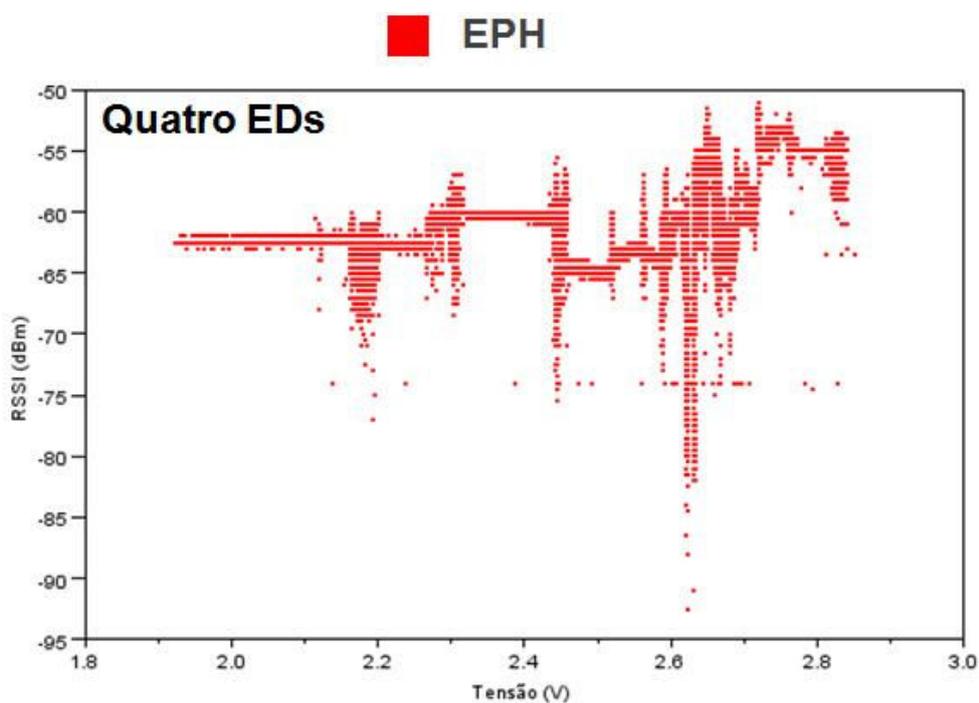


(a)

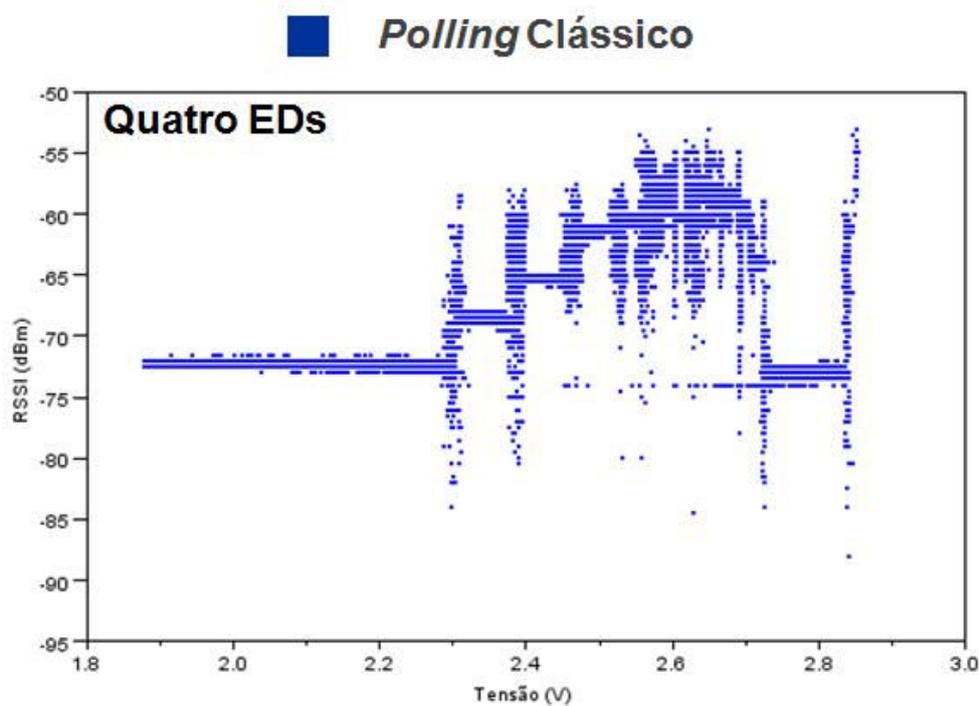


(b)

Figura 38. RSSI em função do tempo para uma rede com quatro EDs. (a) EPH e (b) *polling* clássico.



(a)



(b)

Figura 39. RSSI em função da tensão para uma rede com quatro EDs. (a) EPH e (b) *polling* clássico.

6.5. Agregação de Dados

Conforme descrito no Capítulo 3, foi desenvolvida uma rotina de DA [37] com o intuito de melhorar ainda mais o desempenho da rede quanto ao seu tempo de vida. Por meio desta técnica, menos quadros são transmitidos pelo RT, pois o mesmo reúne os dados dos diversos Eds, para depois encaminhá-los a um nó repetidor ou à base.

As Figuras 40(a) e 40(b) ilustram, respectivamente, os quadros de um ciclo de uma rede com três EDs no *polling* clássico e na EPH. A identificação do sensor que fez a transmissão encontra-se após a inscrição “ID = “ e a tensão da bateria do mesmo encontra-se em destaque por um retângulo de mesma cor. Os quadros de *polling* estão na cor azul, os ED estão representados pelas cores vermelha, bege e laranja e o quadro com a agregação de dados, com destino à BC, em verde, neste último, encontram-se também a identificação e a tensão da bateria de cada um dos EDs coordenados por este RT. Destaca-se a economia de quadros transmitidos para a BC em ambas as situações.

Na Figura 40(a) destaca-se a quantidade de quadros de *polling* (em azul) um para cada ED. Em resumo, no *polling* clássico não existe economia de quadros de *pollings* para os EDs, somente existe economia na transmissão para a BC, devido a DA. Já na Figura 40(b) é possível constatar a ausência de dois quadros de *polling*, portanto, trata-se de uma solução mais eficiente, pois o quadro com os dados agregados contém a mesma quantidade de informação que o do *polling* clássico.

Sem a utilização da técnica de DA, seriam necessários para os exemplos citados, três quadros de retransmissão de dados, que nas figuras é representado pela cor verde. Resumindo, dois a mais dos que as Figuras 40(a) e 40(b) ilustram, com conseqüente aumento do consumo de energia. Portanto, na EPH com DA existe, para este exemplo, uma economia total de quatro transmissões de quadros, dois devido a EPH e dois devido a DA.

```

Mon Aug 20 06:50:38 2012 20 RSSIu = -68.0 RSSId = -79.0 Rot = 13 ED = 0 Erro = 0
dif_rot = 2 dl= 0 1 0 0 ID = 8 10 8 c= 0 0 0 861 904 2.8928 102 2.464 99 2.4704
33 2.2656 12 16.6666666667
Mon Aug 20 06:50:38 2012 21 RSSIu = -62.0 RSSId = -79.0 Rot = 13 ED = 4 Erro = 0
dif_rot = 2 dl= 0 0 7 0 ID = 102 10 222 c= 0 0 4 593 785 2.512 102 2.464 99
2.4704 33 2.2656 4 0.0
Mon Aug 20 06:50:38 2012 22 RSSIu = -68.0 RSSId = -79.0 Rot = 14 ED = 0 Erro = 0
dif_rot = 2 dl= 0 2 0 77 ID = 8 10 8 c= 0 0 0 883 898 2.8736 102 2.464 99 2.4704
33 2.2656 13 15.3846153846
Mon Aug 20 06:50:38 2012 23 RSSIu = -70.5 RSSId = -79.0 Rot = 14 ED = 4 Erro = 0
dif_rot = 2 dl= 0 0 7 0 ID = 99 10 222 c= 0 0 4 664 771 2.4672 102 2.464 99
2.4704 33 2.2656 4 0.0
Mon Aug 20 06:50:38 2012 24 RSSIu = -67.0 RSSId = -79.0 Rot = 15 ED = 0 Erro = 0
dif_rot = 2 dl= 0 3 0 80 ID = 8 10 8 c= 0 0 0 881 897 2.8704 102 2.464 99 2.4704
33 2.2656 14 14.2857142857
Mon Aug 20 06:50:38 2012 25 RSSIu = -61.0 RSSId = -79.0 Rot = 15 ED = 3 Erro = 0
dif_rot = 2 dl= 0 0 7 0 ID = 33 10 222 c= 0 0 3 643 715 2.288 102 2.464 99
2.4704 33 2.2656 3 0.0
Mon Aug 20 06:50:38 2012 26 RSSIu = -66.0 RSSId = -75.5 Rot = 16 ED = 3 Erro = 0
dif_rot = 2 dl= 0 3 0 77 ID = 8 10 222 c= 0 0 3 870 896 2.8672 102 2.512 99
2.4672 33 2.288 15 13.3333333333

```

(a)

```

Sat Sep 01 11:24:23 2012 32 RSSIu = -62.5 RSSId = -67.0 Rot = 16 ED = 0 Erro = 1
dif_rot = 1 dl= 0 2 0 0 ID = 8 10 8 c= 0 0 0 855 899 2.8768 102 2.6208 99 2.4736
33 2.5728 15 6.6666666667 176 176
Sat Sep 01 11:24:24 2012 33 RSSIu = -78.0 RSSId = -67.0 Rot = 16 ED = 7 Erro = 1
dif_rot = 1 dl= 0 0 7 0 ID = 99 10 222 c= 0 0 7 690 769 2.4608 102 2.6208 99
2.4736 33 2.5728 7 0.0 177 176
Sat Sep 01 11:24:24 2012 34 RSSIu = -57.0 RSSId = -67.0 Rot = 16 ED = 7 Erro = 1
dif_rot = 1 dl= 0 0 7 0 ID = 33 10 222 c= 0 0 7 764 811 2.5952 102 2.6208 99
2.4736 33 2.5728 6 16.6666666667 177 176
Sat Sep 01 11:24:24 2012 35 RSSIu = -61.0 RSSId = -67.0 Rot = 16 ED = 7 Erro = 1
dif_rot = 1 dl= 0 0 7 0 ID = 102 10 222 c= 0 0 7 684 821 2.6272 102 2.6208 99
2.4736 33 2.5728 7 0.0 177 176
Sat Sep 01 11:24:24 2012 36 RSSIu = -63.5 RSSId = -65.5 Rot = 17 ED = 7 Erro = 1
dif_rot = 1 dl= 0 1 4 197 ID = 8 10 222 c= 0 0 7 859 895 2.864 102 2.6272 99
2.4608 33 2.5952 16 6.25 174 177

```

(b)

Figura 40. Quadros transmitidos em um ciclo de uma rede com três EDs do polling clássico (a) e da EPH (b).

Neste capítulo, foram apresentados e discutidos os resultados referentes à comparação da EPH com a técnica de *polling* clássico em ambiente fechado. Estes resultados preliminares obtidos indicam a viabilidade desta nova proposta. No próximo capítulo serão discutidas as conclusões de todo este trabalho, bem como, os trabalhos que se seguirão na sequência deste.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO

Neste trabalho, desenvolveu-se e implementou-se uma estratégia de *polling* híbrida (EPH), para a Plataforma RADIUINO, voltada ao prolongamento do tempo de vida dos nós roteadores em redes de sensores sem fio. A característica híbrida da estratégia reside na seleção, de forma automática, da técnica de *polling* para a comunicação entre os nós coletores e o roteador. Especificamente, a técnica poderá ser o *hub-polling* ou o *roll-call polling*, sendo a primeira delas a escolha padrão, desde que haja visada entre todos os nós da rede para a formação de um anel. Caso contrário, será utilizado o *roll-call polling*. Observa-se que a escolha padrão recai sobre o *hub-polling* porque este permitirá a redução do número de quadros de *polling* transmitidos pelo nó roteador, o que terá impacto direto no consumo de energia da rede e, portanto, em seu tempo de vida.

No intuito de se investigar a estratégia da EPH em uma situação genérica, considerou-se a sua implementação e investigação em uma rede de sensores com vários saltos, o que demandou modificações nas bibliotecas originais do RADIUINO, chamadas de BASE e SENSOR. As modificações na BASE visaram permitir o recebimento de quadros independente de eles terem sido a ela destinados originalmente. Tal recurso, por exemplo, viabilizaria a mudança do canal de operação, na eventualidade de haver nós de outra rede em sua visada (e em um mesmo canal). No que se refere à biblioteca SENSOR, incluiu-se nela uma rotina de dormência e de espera para chamadas e esta foi renomeada para ED. Além disso, foi necessária a criação de duas novas bibliotecas, que foram denominadas de RT, para o nó roteador, e RN, para o nó repetidor. Este último nó, em conformidade com o seu próprio nome, é utilizado quando a distância entre dois nós exceder o alcance entre os transceptores. Ao contrário do que acontece na técnica de *polling* clássico, que necessita que cada nó coletor (ED) seja chamado pelo roteador, na EPH, somente o primeiro ED é chamado e os demais seguem uma sequência de envio a partir do quadro de dados do primeiro ED. Isto é possível, visto que todos os nós coletores têm visada entre si, de

acordo com a estratégia do *hub-polling*. Desta forma, e como seria esperado, a EPH se mostra bem mais eficiente em termos energéticos do que a técnica de *polling* clássico. De acordo com os experimentos realizados, que confirmam o modelo proposto, esta eficiência se torna mais significativa conforme aumenta-se o número de dispositivos da rede. Quantitativamente, a EPH proporciona um economia de 3,81 mJ por nó coletor da RSSF quando comparada ao *polling* clássico. Tal resultado tem origem no menor tempo de atividade do nó roteador (RT), o que, também de acordo com os resultados experimentais, indica 65,6 ms por dispositivo a menos do que a técnica clássica. Tudo isso tem um impacto direto no tempo de vida da RSSF, tendo sido encontrado, aumentos de 12,14 e 32,14%, respectivamente, para redes com três e quatro sensores, reiterando a superioridade da técnica proposta conforme aumenta-se o número de EDs. Com relação ao número de quadros transmitidos, nos mesmos experimentos, com três e quatro EDs, o aumento da EPH comparada à técnica clássica foi de 26,35 e 44,79%, respectivamente. Ainda no que se refere à eficiência energética, e consecutivamente ao prolongamento do tempo de vida da rede, adicionou-se à plataforma Radiumo uma estratégia para agregação de dados, recurso que era até então nela inexistente.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se destacar a avaliação do desempenho da técnica para redes com um número maior de nós e com diferentes períodos de atividade dos RTs.

REFERÊNCIAS

- [1] Jianliang Zheng, et al., "Will IEEE 802.15.4 make ubiquitous networking a reality?: a discussion on a potential low power, low bit rate standard", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 42 No. 6, 2004.
- [2] Jaime Lloret, et al., "A Wireless Sensor Network Deployment for Rural and Forest Fire Detection and Verification", *Sensors - Open Access Journal*, 2009.
- [3] Kshitij Shinghal, et al, "Wireless Sensor Networks in Agriculture: for Potato Farming", *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2(8), 3955-3963, 2010.
- [4] Gang Zhao, "Wireless Sensor Networks for Industrial Process Monitoring and Control: A Survey", *Network Protocols and Algorithms*, Vol.3, No1, 2011.
- [5] Zahmati Amir Sepasi, (2007) "EPMPLCS: An Efficient Power Management Protocol with Limited Cluster Size for Wireless Sensor Networks", *27th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2007. ICDCSW '07*, pp.78.
- [6] S. Tao, K. Marwan, "Coverage-Time Optimization for Clustered Wireless Sensor networks: A Power-Balancing Approach," *IEEE Trans. on Networking*, vol. 2, no. 1, 2010, pp. 202–215.
- [7] Chilukuri Shanti and Anirudha Sahoo, "Distributed Fault Tolerance for WSNs with Routing Tree Overlays", *IEEE International Conference on COMmunication Systems and NETworks (COMSNETS)*, Bangalore, India, January 2011.
- [8] Wei Ye, et al., "Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 12 No. 3, 2004
- [9] Rezaei Z, Mobininejad S., "Energy saving in wireless sensor networks", 2012,3(1):23–37. [doi:10.5121/ijcses.2012.3103], *International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSSES)* Vol.3, No.1, February 2012
- [10] Haiming Yang and Biplab Sikdar, "Performance Analysis of Polling based TDMA MAC Protocols with Sleep and Wakeup Cycles", *Department of ECSE, RPI, Troy NY 12180 USA, ICC 2007 proceedings*.
- [11] Vongsagon Boonsawat, et al., "XBee Wireless Sensor Networks for Temperature Monitoring", *School of Information, Computer, and Communication Technology - Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Pathum-Thani, Thailand 12000*, 2010.

- [12] Joseph Kabara and Maria Calle, "MAC Protocols Used by Wireless Sensor Networks and a General Method of Performance Evaluation", *Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2012, Article ID 834784, 11 pages, doi:10.1155/2012/834784, 2011*
- [13] Viral V. Kapadia, et. al. "COMPARATIVE STUDY OF HIDDEN NODE PROBLEM AND SOLUTION USING DIFFERENT TECHNIQUES AND PROTOCOLS", *JOURNAL OF COMPUTING, VOLUME 2, ISSUE 3, MARCH 2010, ISSN 2151-9617*
- [14] M. Ramakrishnan and P. Vanaja Ranjan, "Optimal Power Control with Overhearing Avoidance for Wireless Sensor Networks", *ISSN 1549-3636 © 2009 Science Publications, Journal of Computer Science 5 (4): 297-301, 2009.*
- [15] Alec Woo and David E. Culler, "A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks", *Computer Science Division, University of California, Berkeley, In Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking (2001), pp. 221-235, doi:10.1145/381677.381699.*
- [16] Tiago P. C. de Andrade, Nelson L. S. da Fonseca, Leonardo B. Oliveira and Omar C. Branquinho, "Protocolos MAC para Integração de Redes de Sensores sem Fio baseado em Rádio-sobre-Fibra", *XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2012.*
- [17] S. Anandamurugan and C. Venkatesh, "Power Saving Scheme (PSS) in Clusters of Heterogeneous Wireless Sensor Networks", *(IJCSE) International Journal on Computer Science and Engineering Vol. 02, No. 06, 2010, 1966-1972*
- [18] Rozeha A. Rashid, Wan Mohd Ariff Ehsan W. Embong, Azami Zaharim and Norsheila Fisal, "Development of Energy Aware TDMA Based MAC Protocol for Wireless Sensor Network System", *European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.30 No.4 (2009), pp.571-578*
- [19] J. A. STINE and G. DE VECIANA, "Improving Energy Efficiency of Centrally Controlled Wireless Data Networks", *2002 Kluwer Academic Publishers. Manufactured in The Netherlands, Wireless Networks 8, 681–700, 2002*
- [20] Nikolaos A. Pantazis, "Energy efficiency in wireless sensor networks using sleep mode TDMA scheduling", *ELSEVIER, Ad Hoc Networks, Volume 7, Issue 2, March 2009, Pages 322–343, 2009.*
- [21] Qinghua Wang and Ilango Balasingham, "Wireless Sensor Networks - An Introduction", *Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design, ISBN: 978-953-307-321-7, DOI: 10.5772/13225, 2010.*
- [22] Abdelmalik Bachir, et. al., "MAC Essentials for Wireless Sensor Networks", *IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 12, no. 2, pp. 222-248, 2010.*
- [23] L. Mendes and J. Rodrigues, "A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications, vol. 34, pp. 523–534, mar 2011.*

- [24] J. T. Adams, "An introduction to IEEE STD 802.15.4", *IEEE Aerospace Conference*, Jul. 2007, pp. 8.
- [25] I.F. Akyildiz, et al., "Wireless sensor networks: a survey", *Computer Networks* 38 (2002) 393–422, Elsevier.
- [26] Bin Tong, et. al., "Node Reclamation and Replacement for Long-lived Sensor Networks", *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Volume 22, Number 9, September 2011.
- [27] Milone Technologies, Inc, http://www.milonetech.com/Home_Page.html, Acesso em 23 de Dezembro de 2012, disponível em: http://www.milonetech.com/Home_Page.html.
- [28] eTape (12 de Outubro de 2012). [http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Pressure/eTape%20Data sheet%2012110215TC-8.pdf](http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Pressure/eTape%20Data%20sheet%2012110215TC-8.pdf). Acesso em 12 de Outubro de 2012, disponível em eTape: [http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Pressure/eTape%20Data sheet%2012110215TC-8.pdf](http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Pressure/eTape%20Data%20sheet%2012110215TC-8.pdf).
- [29] G 1/2 Water Flow sensor - model POW110D3B, <http://lib.chipdip.ru/583/DOC000583441.pdf>, Acesso em 12 de Outubro de 2012, disponível em chipdip: <http://lib.chipdip.ru/583/DOC000583441.pdf>
- [30] Water Flow Sensor, <http://www.robotshop.com/content/PDF/datasheet-pow110d3b.pdf>, Acesso em 12 de Outubro de 2012, disponível em robotshop: <http://www.robotshop.com/content/PDF/datasheet-pow110d3b.pdf>
- [31] Faludi, Robert, "Building Wireless Sensor Networks", O`Reilly, 2010.
- [32] S. Nannicini and T. Pecorella, "Performance Evaluation of Polling Protocols for Data Transmission on Wireless Communication Networks", *Proc. Universal Personal Comm., IEEE Int. Conf. on*, vol.2, pp.1241-1245, 5-9 Oct., 1999.
- [33] ftp://ftp1.digi.com/support/documentation/90000866_f.pdf, 2011, pp. 20.
- [34] Fan Yang, Chun He and Huai-zong Shao, "Two Simplified Coding Schemes for Wireless Sensor Networks with Star Topologies", *International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2010.
- [35] Hideaki Takagi, "Application of polling models to computer networks", *Computer Networks and ISDN Systems* 22 (1991) 193-211 North-Holland, Elsevier Science Publishers B. V., 1991.
- [36] A. Young and M. Ling, "Minimising loss-induced errors in real time wireless sensing by avoiding data dependency", *Wearable and Implantable Body Sensor Networks, International Workshop on*, pp. 327-332, 2009.

- [37] Nandini. S. Patil and Prof. P. R. Patil, "Data Aggregation in Wireless Sensor Network", *2010 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*.
- [38] Radiuino, <http://www.radiuino.cc>. Acesso em 14 de Junho de 2012, disponível em Radiuino: <http://www.radiuino.cc/>.
- [39] SourceForge, <http://sourceforge.net/projects/radiuino/>, Acesso em 02 de novembro de 2012, disponível em <http://sourceforge.net/projects/radiuino/>.
- [40] Arduino. (13 de Março de 2012). www.arduino.cc. Acesso em 13 de Março de 2012, disponível em Arduino: Disponível em <http://arduino.cc/hu/Main/Software>.
- [41] *GNU Library or Lesser General Public License version 2.0*, <http://www.gnu.org/licenses/gpl-2.0.html>, Acesso em 18 de Novembro de 2012, disponível em <http://www.gnu.org/licenses/gpl-2.0.html>.
- [42] Raioit, <http://www.radioit.com.br/sites/default/files/downloads/BE900-Datasheet.pdf>, Acesso em 02 de Novembro de 2012, disponível em <http://www.radioit.com.br/sites/default/files/downloads/BE900-Datasheet.pdf>.
- [43] Seeed Studio, <http://www.seeedstudio.com>. Acesso em 13 de Março de 2012, disponível em Seed Studio: <http://www.seeedstudio.com/depot/rfbee-v11-wireless-arduino-compatible-node-p-614.html>.
- [44] ATmega48/88/168. <http://www.atmel.com>. Acesso em 13 de Março de 2012, disponível em Atmel: <http://www.atmel.com/Images/doc2545.pdf>.
- [45] Texas Instruments. <http://www.ti.com>. Acesso em 13 de Março de 2012, disponível em Texas Instruments: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1101.pdf>.
- [46] Thiemo Voigt, et. al., "Improving Sensor Network Robustness with Multi-Channel Convergecast", in *Proc. 2nd ERCIM Workshop on e-Mobility, Tampere, Finland, May 2008*.
- [47] Sleeping Arduino - Part 5 Wake Up Via The Watchdog, <http://donalmmorrissey.blogspot.com.br/2010/04/sleeping-arduino-part-5-wake-up-via.html>, Acesso em 12 de Outubro de 2012, disponível em: <http://donalmmorrissey.blogspot.com.br/2010/04/sleeping-arduino-part-5-wake-up-via.html>.
- [48] AnalogReference, <http://www.arduino.cc/en/Reference/AnalogReference>, Acesso em 12 de Outubro de 2012, disponível em: <http://www.arduino.cc/en/Reference/AnalogReference>.
- [49] Chulsung Park, et. al., "Battery Discharge Characteristics of Wireless Sensor Nodes: An Experimental Analysis", *0-7803-9012-1/05/\$20.00 (C) 2005 IEEE*.

- [50] Alec Woo and David E. Culler, "A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks", *Proceeding MobiCom '01 Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, Pages 221-235, 2001.
- [51] Giacomini, J. A. C. and Vasconcelos, F. H. "Qualidade da Medição de Intensidade de Sinal nas Comunicações de uma Rede de Sensores Sem Fios: uma Abordagem da Camada Física", *INFOCOMP Journal of Computer Science*, 5(1):83–92, 2006.
- [52] Agilent 54621A/22A/24A/41A/42A Oscilloscopes and Agilent 54621D/22D/41D/42D Mixed-Signal Oscilloscopes, "User's Guide", *Publication Number 54622-97036*, September 2002.
- [53] Projeto FINEP-CEATEC-HIDRO, <http://www.puc-campinas.edu.br/websist/portal/ceatec/hidro/>, Acesso em 23 de Dezembro de 2012, disponível em: <http://www.puc-campinas.edu.br/websist/portal/ceatec/hidro/>.
- [54] Murray R. Spiegel, "Probabilidade e Estatística", McGraw-Hill do Brasil, 1978.

ANEXO A – Períodos de atividade do RT na EPH e no *polling* clássico.

Tabela 1. Tempos dos ciclos em função da Quantidade de EDs em ms.

Quantidade de EDs	<i>Polling</i> Clássico	EPH	Diferença	i
2	500	432	68	0
3	636	504	132	64
4	788	580	208	76
5	928	652	276	68
6	1068	740	328	52

(i) aumento da diferença de tempo entre o *polling* clássico e a EPH, devido a adição de mais um ED na rede, cujo valor médio é 65,6 ms.

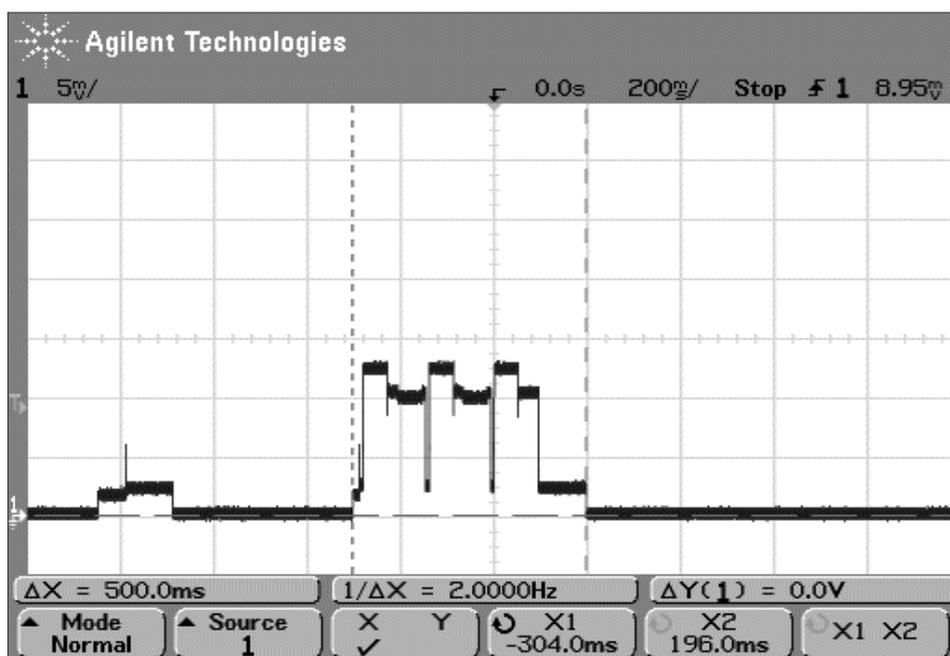


Figura 41. Tempo de atividade do nó RT para 2 EDs no *polling* clássico.

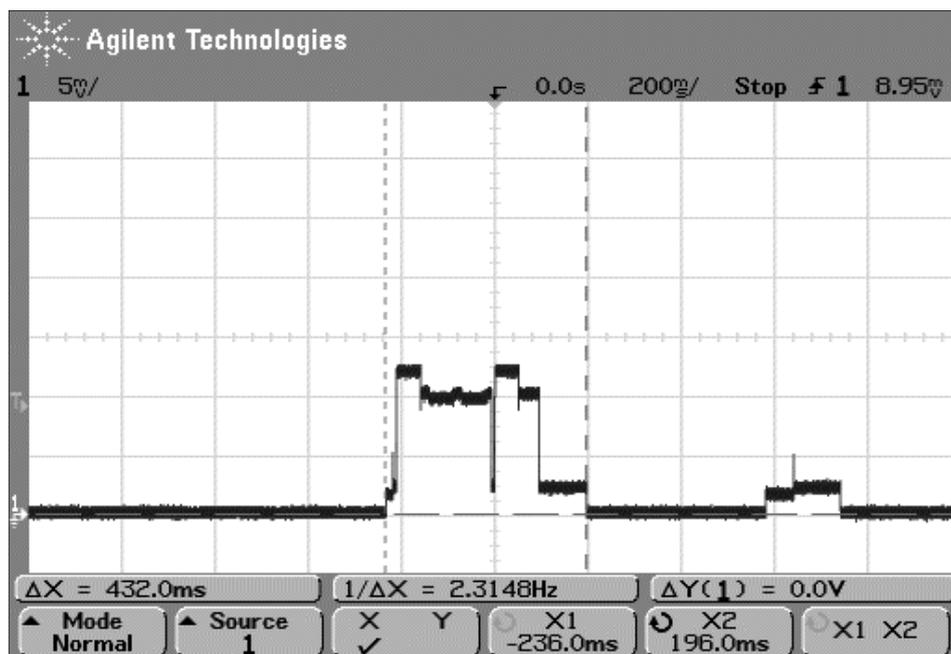


Figura 42. Tempo de atividade do nó RT para 2 EDs na EPH.

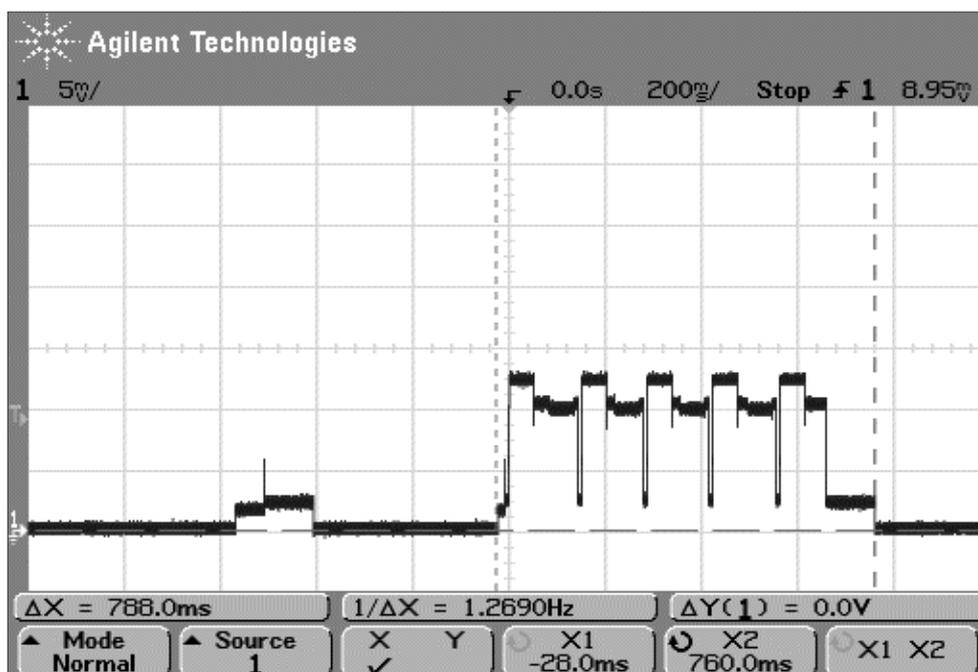


Figura 43. Tempo de atividade do nó RT para 4 EDs no *polling* clássico.

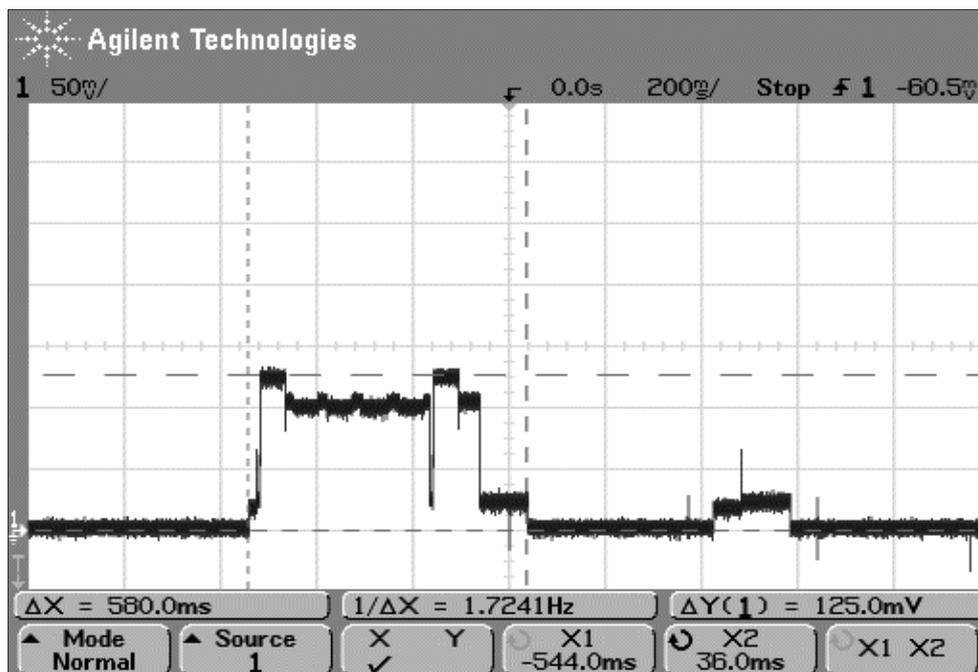


Figura 44. Tempo de atividade do nó RT para 4 EDs na EPH.

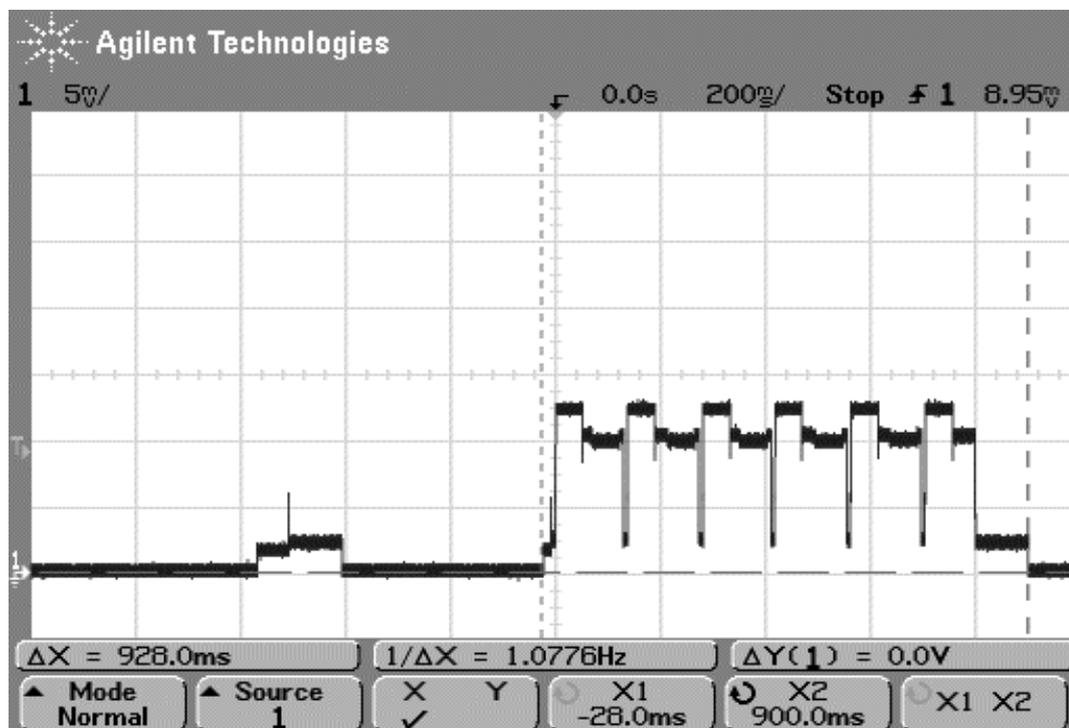


Figura 45. Tempo de atividade do nó RT para 5 EDs no *polling* clássico.

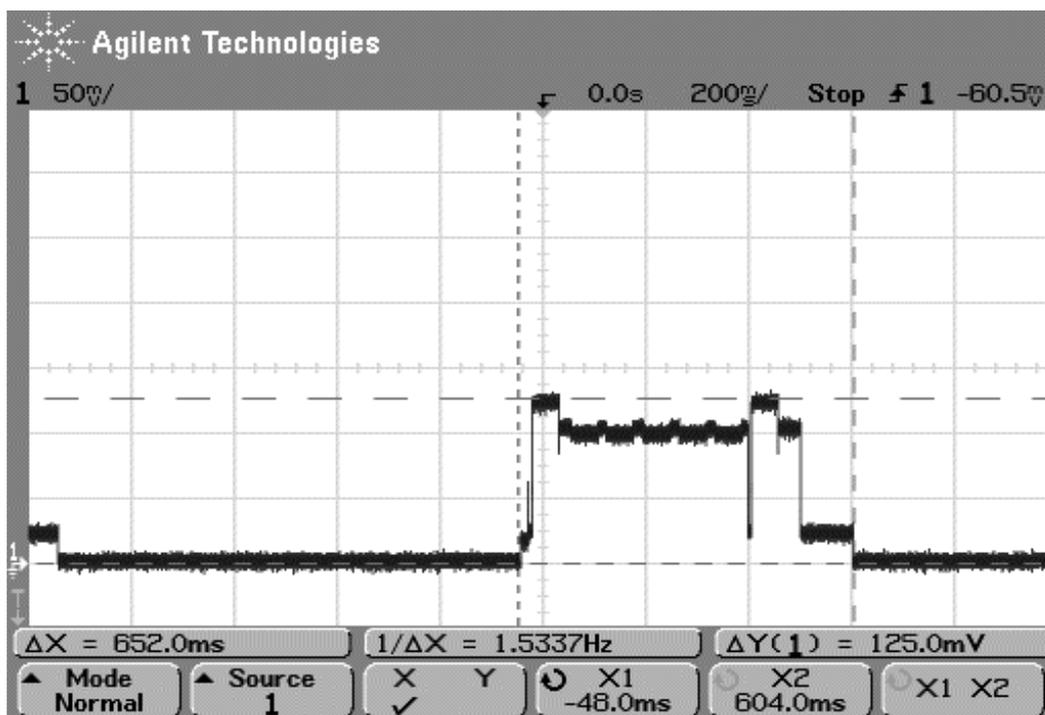


Figura 46. Tempo de atividade do nó RT para 5 EDs na EPH.

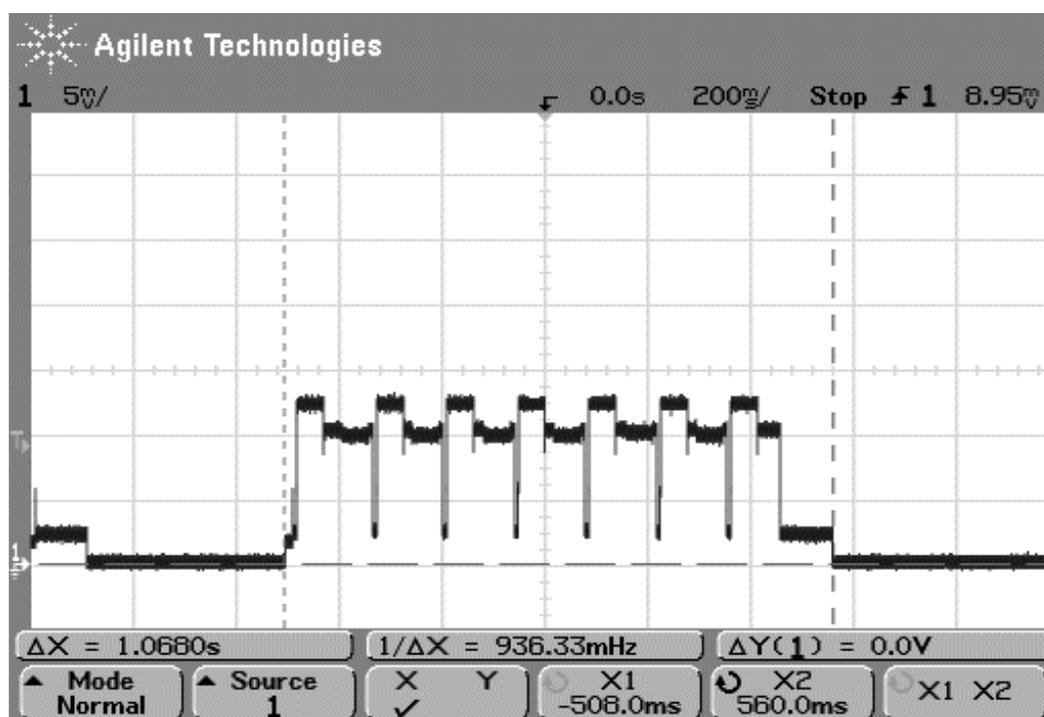


Figura 47. Tempo de atividade do nó RT para 6 EDs no *polling* clássico.

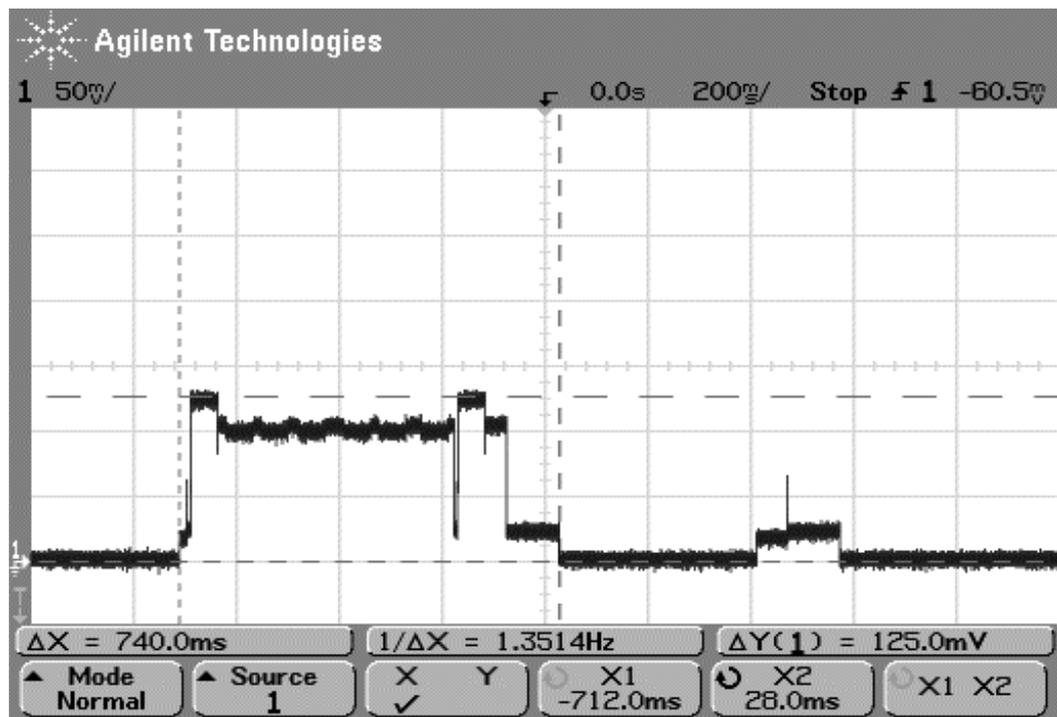


Figura 48. Tempo de atividade do nó RT para 6 EDs na EPH.

ANEXO B – Valores de tensão, corrente e energia dos diversos estágios, pelo qual o nó RT passa em cada um de seus ciclos.

Tabela 2. Valores de corrente do RFBee medidos e fornecidos pelo Fabricante [43]

Estado	Tensão Coletada no Resistor de 5 Ω (mV)	Corrente Coletada (mA)	Corrente Data Sheet (mA)
Transmitindo	120	24	34,5
Recebendo	97,50	20,63	18,1
de Idle	21,88	4,37	5,2
de Dormência	0,375	0,075	< 0,3

Tabela 3. Comparação do consumo de energia entre a EPH e o *Polling* Clássico

Quantidade de EDs	<i>Polling</i> Clássico (mJ)	EPH (mJ)	Diferença (mJ)
2	20,35	24,21	3,86
3	23,88	31,40	7,52
4	27,78	39,42	11,63
5	31,30	46,79	15,49
6	35,63	53,91	18,28

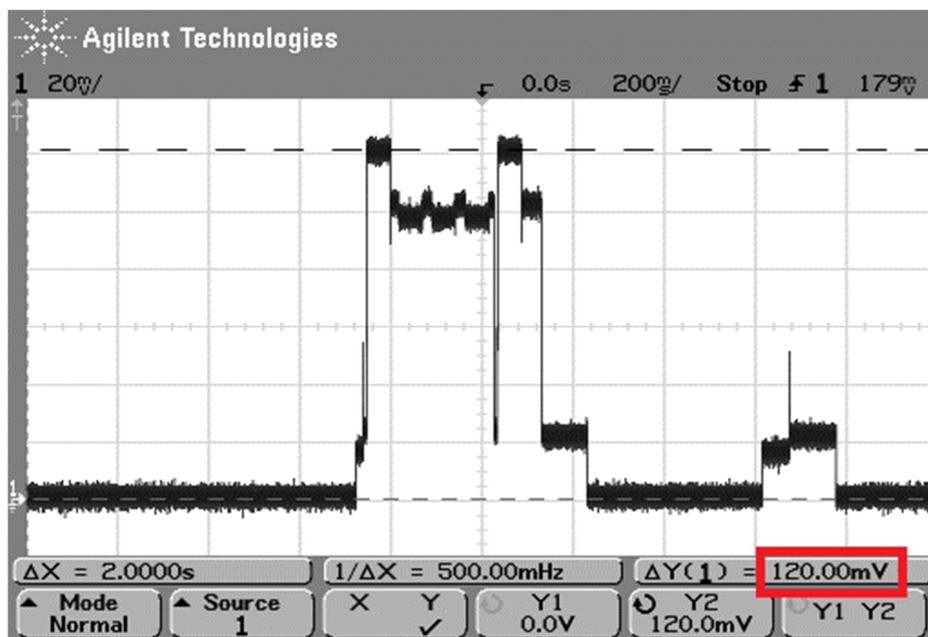


Figura 49. Tensão no resistor de $5\ \Omega$ ligado em série com o nó RT no período de transmissão com potência máxima do RFBee.

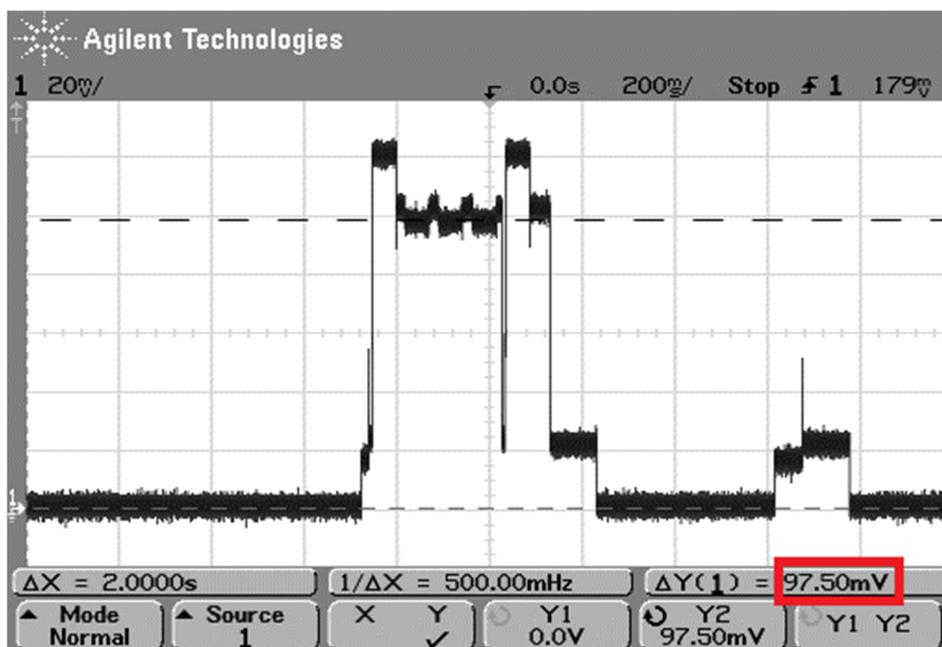


Figura 50. Tensão no resistor de $5\ \Omega$ ligado em série com o nó RT no período de recepção com potência máxima do RFBee

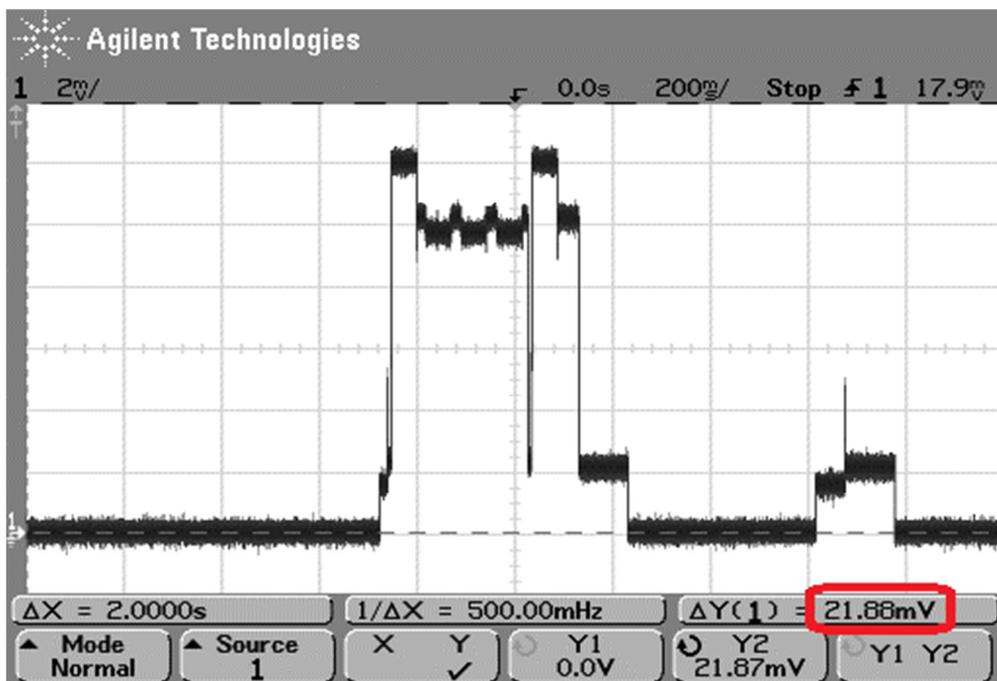


Figura 51. Tensão no resistor de $5\ \Omega$ ligado em série com o nó RT no período de transição (*Idle*) para dormência com potência máxima do RFBee

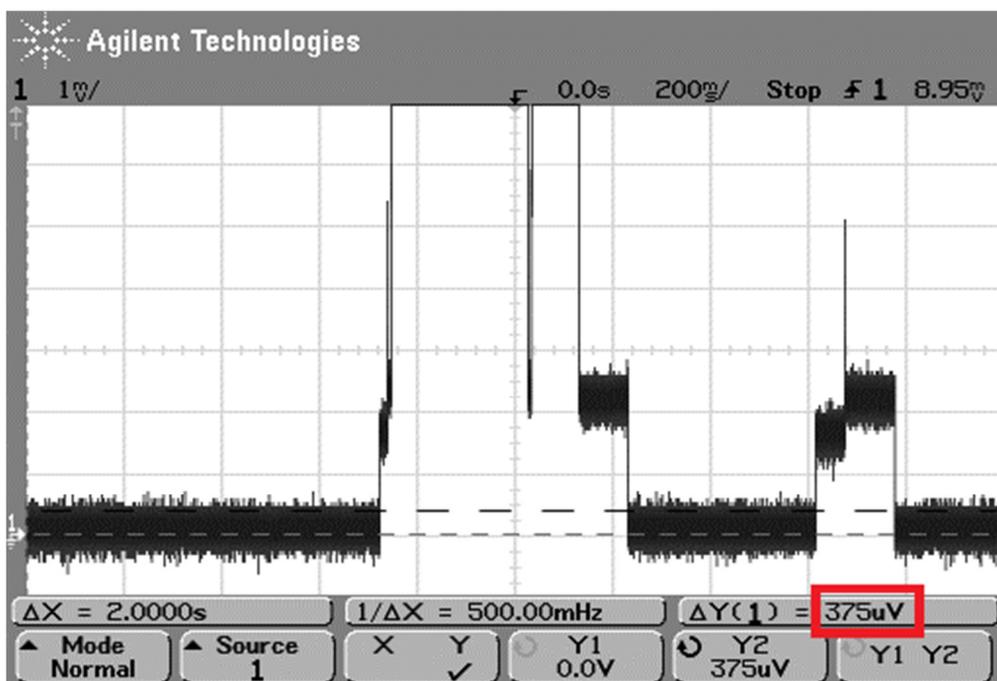


Figura 52. Tensão no resistor de $5\ \Omega$ ligado em série com o nó RT no período de dormência com potência máxima do RFBee

APÊNDICE A – Aplicação para medição do nível de água em um evaporímetro

Ao longo deste trabalho, surgiu a oportunidade de se implementar uma RSSF que opere de acordo com a EPH para coletar dados para o Grupo de Sustentabilidade Ambiental para as Cidades (GSAC) da PUC-Campinas. Dentre os dados a serem coletados, o nível de água de um tanque de evaporação (evaporímetro) é o mais importante. O financiamento para a compra de equipamentos se deu mediante o Projeto FINEP/CEATEC/HIDRO, Ref. 2190/07, cujo objetivo é apresentar dados sobre a Bacia Hidrológica Experimental Santa Cândida. Este projeto é subdividido em quatro subprojetos: Manejo de Águas Pluviais em Área Urbana, Desenvolvimento de Dispositivos de Infiltração, Aproveitamento de Energia Solar e Desenvolvimento de Dispositivos para Monitoramento do Consumo de Água [53].

O evaporímetro (Figura 53) encontra-se na Estação Meteorológica localizada no estacionamento da Reitoria da PUC-Campinas. O local escolhido para a colocação da BC foi uma sala que fica no mezanino do Laboratório de Engenharia Ambiental. Na Fig. 54(a) tem-se a visão de satélite do local do experimento, com destaque para os dois pontos extremos da rede. Na Fig. 54(b) tem-se um esquemático que permite apreciar a distribuição espacial da rede, com os nós representados por um código de cores, que identifica sua função na rede (BC em preto, de RN1 a RN5 em azul, RT em verde e de ED1 a ED3 em vermelho).



Figura 53. Foto do evaporímetro, localizado nas proximidades da Reitoria da PUC-Campinas.

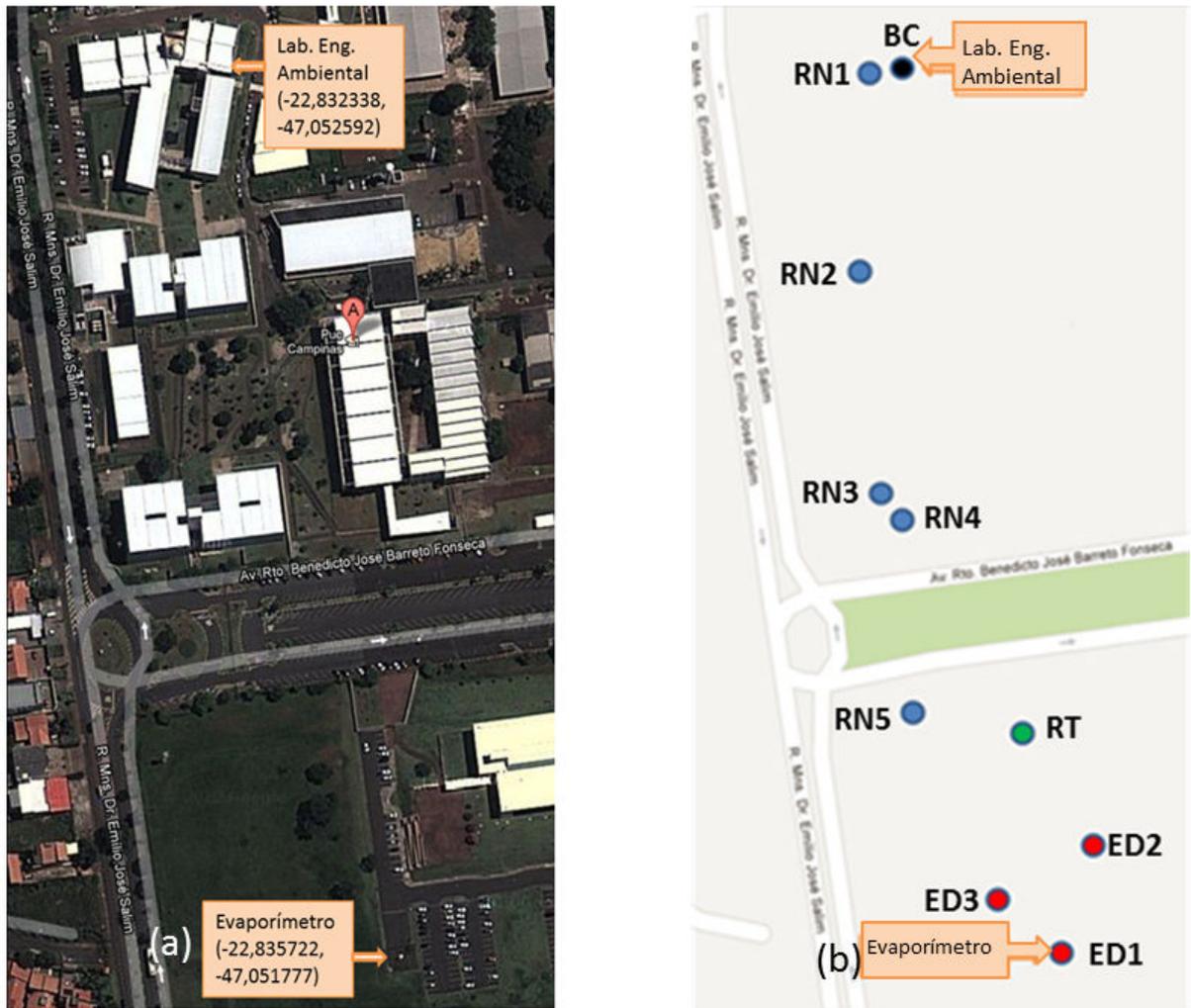


Figura 54. Foto e mapa da PUC-Campinas, reproduzidas do Site <http://google.maps.com.br>. (a) foto da localização do Lab. de Engenharia Ambiental e do evaporímetro e (b) mapa com a localização dos nós da rede para o teste em ambiente aberto.

A Figura 55 mostra a distância entre o Mezanino do Laboratório de Hidráulica de Engenharia Ambiental do CEATEC e o evaporímetro. Em linha reta, esta distância é de aproximadamente 385 m (Figura 55(a)). No entanto, esta distância aumentou para pouco mais de 448 m em função do alcance dos rádios, e a presença de obstáculos (Figura 55(b)).



Figura 55. Distâncias entre o Mezanino do Laboratório de Hidráulica de Engenharia Ambiental do CEATEC até o evaporímetro. (a) tem-se o caminho em linha reta e em (b) o caminho considerando-se a localização dos sensores.

A Figura 56 mostra a topologia da RSSF do Projeto FINEP-CEATEC-HIDRO, com a localização dos sensores em pontos identificados por letras (de A a H) bem como a distância entre os mesmos. A curta distância entre os pontos A e B e entre os pontos D e E, em ambos os casos, é explicada pela atenuação do sinal devido à presença de obstáculos [51]. No ponto A, encontram-se o computador e a BC em uma sala fechada e no ponto D o nó RN3 encontra-se aproximadamente a 5 m acima do nó RN2 (ponto E) com dois lances de rampa de concreto entre eles.

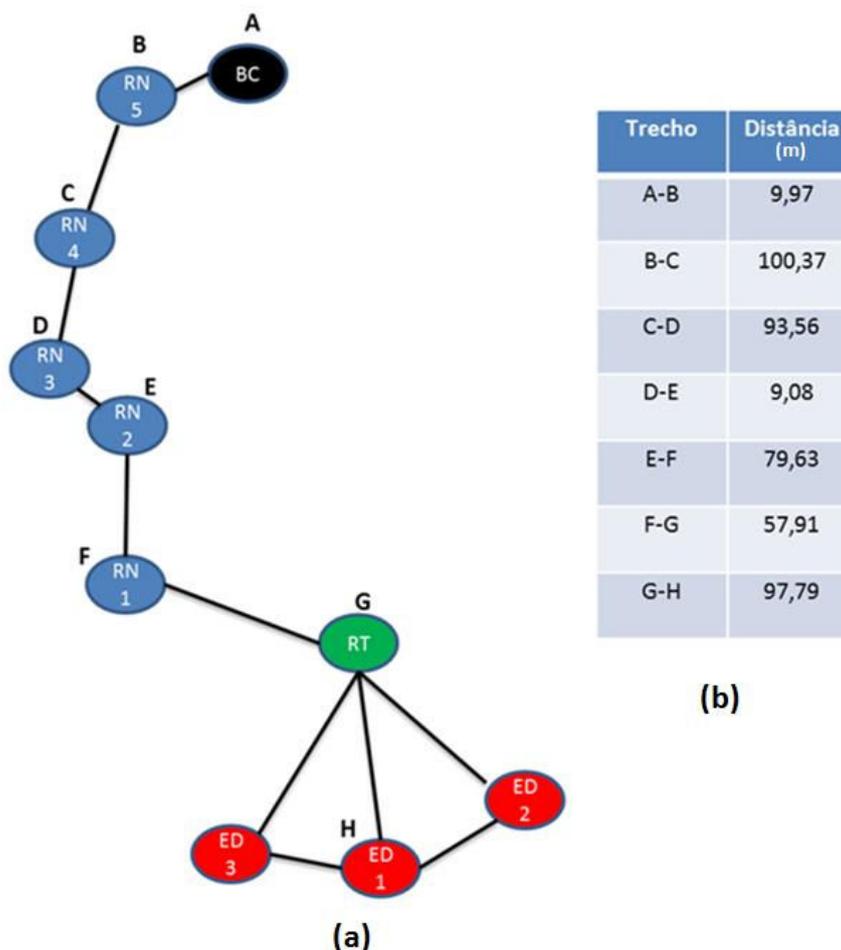


Figura 56. (a) Topologia da RSSF para coleta de informações de nível de água do evaporímetro, temperatura e luminosidade. (b) Distância em metros entre os pontos da RSSF do Projeto FINEP-CEATEC-HIDRO.

A distância entre a Base Central e o local a ser monitorado ultrapassa 400 m. Isto torna propícia a aplicação da técnica de DA [37] no nó RT, antes da transmissão dos dados pelos diversos nós repetidores que serão necessários para vencer esta distância. Assim, deve haver economia de energia não só no nó RT, como também nos nós RN.

a) Calibração dos Sensores

Para o Projeto FINEP-CEATEC-HIDRO foram adquiridos dois sensores de nível eTape PN 12110215TC-8 [28]. Tais sensores são resistores variáveis ($300-1500\Omega \pm 10\%$), cuja resistência é inversamente proporcional ao nível do líquido, no qual se encontram imersos.

A calibração seguiu o procedimento proposto na documentação do fabricante [28] (Figura 57). Para isso, mediu-se a tensão V_{out} sobre o resistor variável R_{sense} , que, além de formar um divisor de tensão com o resistor R_{ref} , conecta-se ao pino 15 do RFBee, que é a entrada de um conversor analógico digital de 10 bits.

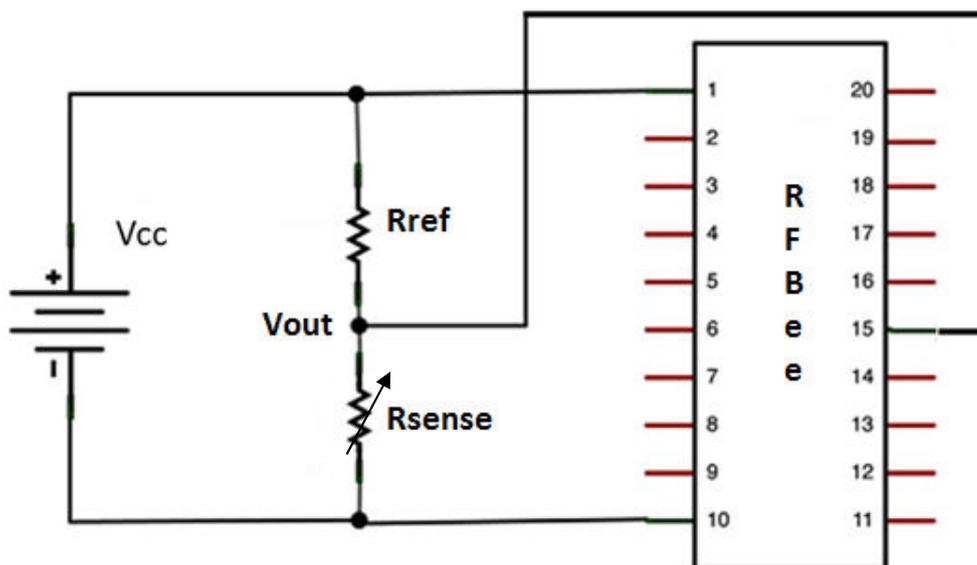


Figura 57. Circuito utilizado para coletar os valores de tensão de acordo com o nível de água do evaporímetro em cm. Figura adaptada de [31].

O valor de tensão de 3,3 V corresponde ao fundo da escala do conversor, ou seja, ao inteiro 1023.

Quando das medições para calibração com os sensores de nível de líquido adquiridos para o Projeto FINEP-CEATEC-HIDRO, constatou-se que a resistência dos dispositivos não variou para níveis abaixo de 35 mm, o que é previsto na documentação fornecida pelo fabricante [28]. Estas medições propiciaram a construção do gráfico da Figura 58.

No gráfico da Figura 58, encontra-se a curva de calibração para o sensor eTape, as barras de erro referentes a esta medição não estão presentes neste gráfico, devido aos valores das incertezas serem muito baixos. A equação correspondente foi ajustada mediante o método dos mínimos quadrados [54] e implementada na aplicação de apuração do nível de água do evaporímetro, de forma que as saídas da aplicação já serão em centímetros, facilitando o tratamento dos dados.

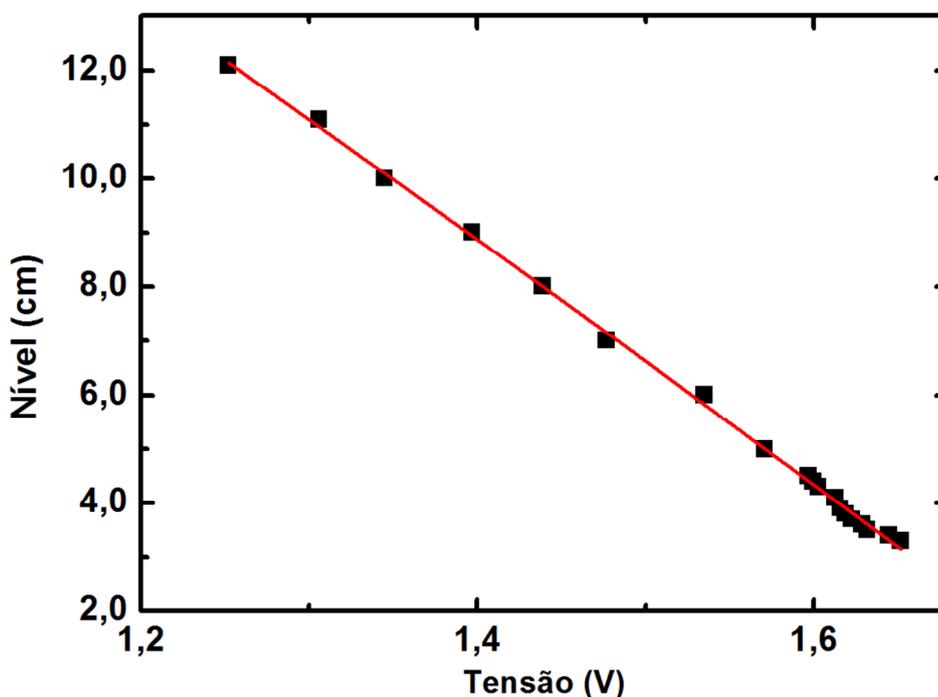


Figura 58. Curva de calibração, Nível do líquido *versus* a Tensão na saída do sensor eTape [28]

A Figura 59 mostra as primeiras saídas da aplicação, que se utilizará dos dados coletados pelo ED1 da Figura 54, para fornecer o nível de água do evaporímetro, que está em destaque pelos retângulos em vermelho. Por meio desta saída criou-se a Tabela 4, na qual, existe uma coluna referente ao percentual do erro, que é a diferença entre o nível da água observado, segundo a escala impressa no próprio transdutor de nível e o valor calculado pela aplicação. Este percentual de erro é sempre inferior a 10%, portanto, dentro da margem de erro fornecida pelo fabricante [28].

```

Sun Nov 11 20:19:27 2012 0 Pacote num = 0 RSSIu = -94.5 dBm RSSId =
-74.0 dBm AD0 = 397 AD1 = 458 AD2 = 1754 - tensao = 1.28064516129 V
- nivel = 11.5514516129 cm
Sun Nov 11 20:19:31 2012 0 Pacote num = 0 RSSIu = -89.0 dBm RSSId =
-74.0 dBm AD0 = 395 AD1 = 455 AD2 = 1758 - tensao = 1.27419354839 V
- nivel = 11.6969354839 cm
Sun Nov 11 20:19:32 2012 0 Pacote num = 0 RSSIu = -99.0 dBm RSSId =
-74.0 dBm AD0 = 396 AD1 = 454 AD2 = 1759 - tensao = 1.27741935484 V
- nivel = 11.6241935484 cm
Sun Nov 11 20:19:33 2012 0 Pacote num = 0 RSSIu = -99.0 dBm RSSId =
-74.0 dBm AD0 = 397 AD1 = 458 AD2 = 1760 - tensao = 1.28064516129 V
- nivel = 11.5514516129 cm
Sun Nov 11 20:19:34 2012 0 Pacote num = 0 RSSIu = -99.0 dBm RSSId =
-74.0 dBm AD0 = 392 AD1 = 459 AD2 = 1761 - tensao = 1.26451612903 V
- nivel = 11.9151612903 cm
Sun Nov 11 20:19:35 2012 0 Pacote num = 0 RSSIu = -98.5 dBm RSSId =
-74.0 dBm AD0 = 391 AD1 = 458 AD2 = 1762 - tensao = 1.26129032258 V
- nivel = 11.9879032258 cm

```

Figura 59. Saída da aplicação de medição do nível de água do evaporímetro.

Tabela 4. Valores de Tensão em Função do Nível da Água.

Nível do Líquido na Régua do eTape (cm)	Vlr. Apurado pela Aplicação (cm)	Tensão (V)	Erro Absoluto (cm)	Percentual do Erro
3,7	3,841	1,623	-0,141	-3,806
4,1	3,986	1,616	0,114	2,773
5,0	4,714	1,584	0,286	5,726
5,6	5,587	1,545	0,013	0,239
6,0	5,805	1,535	0,195	3,253
6,5	6,096	1,523	0,404	6,218
7,5	7,187	1,474	0,313	4,174
8,1	7,914	1,442	0,186	2,292
8,5	8,278	1,426	0,222	2,611
9,0	8,642	1,410	0,358	3,980
9,5	9,224	1,384	0,276	2,908
10,0	9,733	1,361	0,267	2,671
10,5	10,097	1,345	0,403	3,842
11,1	10,679	1,319	0,421	3,797
11,6	11,551	1,281	0,049	0,419
12,1	11,988	1,261	0,112	0,926

b) Teste de comunicação

A Figura 60 mostra a localização dos dispositivos para coleta de informações de nível de água do evaporímetro. Os pontos estão indicados por letras, e no interior dos mesmos, está a identificação do dispositivo. Sendo os EDs em vermelho, o RT em verde, os RNs em azul e a BC em preto.

O teste para verificação da comunicação entre a Reitoria, onde fica o evaporímetro, e o CEATEC realizou-se com a colocação provisória dos sensores nos locais indicados na Figura 60 e verificando-se a chegada dos quadros em cada ponto, conforme as figuras do Apêndice B.

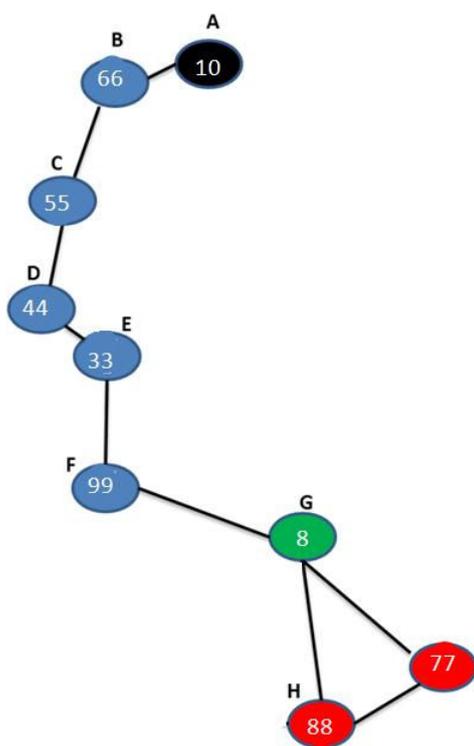


Figura 60. Localização dos dispositivos para coleta de informações de nível de água do evaporímetro.

A comunicação deste teste apresentou momentos de estabilidade mostrados pela Figura 61(a), na qual existem 10 amostras recebidas pela BC (ponto A da Figura 60) no mezanino do Laboratório de Hidráulica da Engenharia Ambiental no CEATEC e pela Figura 61(b), na qual existem 10 amostras transmitidas pelo RT (ponto G da Figura 60) na Reitoria. Ambas as amostragens levaram 31 s para a coleta da primeira à décima amostra. Este teste apresentou alguns momentos de poucos segundos sem tráfego de dados, este problema será investigado, pois para a realização do mesmo respeitou-se o limite de distância para ambientes abertos descritos nas especificações do dispositivo [43].

Time	Date	RSSI	RSSID	Rot	ED	Erro	d1	ID	C
15:43:14	2012 6 6	-87.5	-91.5	19540	38	3	66 0 7 0	66 10 222	C=
15:43:18	2012 7 7	-87.0	-92.0	19552	39	3	66 0 7 0	66 10 222	C=
15:43:21	2012 8 8	-86.5	-91.5	19564	40	3	66 0 7 0	66 10 222	C=
15:43:25	2012 9 9	-86.5	-92.0	19576	41	3	66 0 7 0	66 10 222	C=
15:43:28	2012 10 10	-86.5	-91.5	19588	42	3	66 0 7 0	66 10 222	C=
15:43:31	2012 11 11	-87.5	-91.5	19600	43	3	66 0 7 0	66 10 222	C=
15:43:35	2012 12 12	-88.0	-92.0	19612	44	3	66 0 7 0	66 10 222	C=
15:43:38	2012 13 13	-88.0	-91.5	19624	45	3	66 0 7 0	66 10 222	C=
15:43:42	2012 14 14	-89.0	-92.0	19636	46	3	66 0 7 0	66 10 222	C=
15:43:45	2012 15 15	-89.0	-92.5	19648	47	3	66 0 7 0	66 10 222	C=

(a)

Time	Date	RSSI	RSSID	Rot	ED	Erro	d1	ID	C
16:01:15	2012 21 21	-86.0	-91.5	23317	861	4	0 8 4 133	8 10 222	C=
16:01:19	2012 35 35	-86.5	-91.0	23329	862	4	0 8 4 140	8 10 222	C=
16:01:22	2012 48 48	-82.5	-91.0	23341	863	5	0 8 4 133	8 10 222	C=
16:01:25	2012 62 62	-81.5	-91.0	23353	864	5	0 8 4 131	8 10 222	C=
16:01:29	2012 76 76	-86.0	-91.0	23365	865	5	0 8 4 135	8 10 222	C=
16:01:32	2012 90 90	-87.5	-92.0	23377	866	5	0 8 4 134	8 10 222	C=
16:01:36	2012 103 103	-86.5	-92.0	23389	867	5	0 8 4 136	8 10 222	C=
16:01:39	2012 117 117	-86.0	-92.5	23401	868	5	0 8 4 133	8 10 222	C=
16:01:43	2012 131 131	-86.5	-91.5	23413	869	5	0 8 4 135	8 10 222	C=
16:01:46	2012 145 145	-86.0	-91.0	23425	870	5	0 8 4 141	8 10 222	C=

(b)

Figura 61. Amostragem de quadros recebidos na BC no CEATEC (a) e transmitidos pelo RT na Reitoria (b)

A Tabela 5 mostra que os valores de RSSI são menores quando as distâncias são maiores ou quando existem muitos obstáculos, conforme era de se esperar. Notadamente, este é o caso da transmissão do ponto B para o ponto A, pois o ponto A fica dentro de uma sala no mezanino do Laboratório de Hidráulica da Engenharia Ambiental no CEATEC.

Tabela 5. Valores de RSSI recebidos em cada trecho da aplicação de coleta de dados ambientais

Amostra	RSSI dos Trechos						
	de B para A	de C para B	de D para C	de E para D	de F para E	de G para F	de G para H
1	-87,5	-79,5	-96	-81,5	-98,5	-86,5	-100,5
2	-87	-80	-96,5	-80,5	-97	-87	-101
3	-86,5	-79,5	-96	-79	-98	-89	-99
4	-86,5	-79,5	-95	-78,5	-95,5	-88,5	-100,5
5	-86,5	-79,5	-96	-79	-98	-90,5	-99,5
6	-87,5	-79,5	-96	-79,5	-98	-89	-101,5
7	-88	-79	-95,5	-80	-94,5	-88,5	-101
8	-88	-80	-96	-81,5	-94	-88	-98,5
9	-89	-79	-96	-84,5	-93,5	-88,5	-100,5
10	-89	-80	-96	-84,5	-96	-88	-102
Média	-87,6 ± 1	-80 ± 0,4	-96 ± 0,4	-80,9 ± 2	-96,3 ± 2	-88,4 ± 1	-100,4 ± 1

A implementação da EPH em uma rede em ambiente aberto, com seis saltos, foi um importante teste para a EPH, sobretudo para com o funcionamento dos nós repetidores, cinco no total. Esta implementação trará diversas vantagens ao Grupo de Sustentabilidade Ambiental para as Cidades (GSAC) da PUC-Campinas, dentre elas: realizar a coleta várias vezes ao longo de um mesmo dia e independente das condições climáticas, e, principalmente, ter acesso aos dados à distância, sendo a medição do nível de um tanque de evaporação (evaporímetro) a mais importante.

APÊNDICE B – Captura dos quadros nos pontos de coleta, tratamento e replicação dos dados.

```

Sat Nov 24 15:42:40 2012 1 1 RSSIu = -89.0 RSSId = -92.0 Rot = 19420 ED =
28 Erro = 1 dif_rot = 0 dl= 66 0 7 0 ID = 66 10 222 c= 0 0 28 200 589
1.8848 0 0.0 -74.0 99 2.736 -89.0 33 2.448 -96.0 44 2.4064 -80.0 55
2.4736 -96.0 66 0.0 -78.0 77 3.2736 -90.5 88 2.8544 -92.0 1 100.0
Sat Nov 24 15:42:50 2012 2 2 RSSIu = -89.0 RSSId = -92.0 Rot = 19456 ED =
31 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 66 0 7 0 ID = 66 10 222 c= 0 0 31 200 583
1.8656 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.4224 -96.0 44 2.3552 -79.5 55
2.48 -96.5 66 3.2448 -79.0 77 3.2736 -90.0 88 2.8544 -92.0 2 100.0
Sat Nov 24 15:42:54 2012 3 3 RSSIu = -87.5 RSSId = -91.5 Rot = 19468 ED =
32 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 66 0 7 0 ID = 66 10 222 c= 0 0 32 200 568
1.8176 0 0.0 -74.0 99 2.736 -88.5 33 2.5152 -95.0 44 2.3296 -80.0 55
2.416 -96.0 66 3.2736 -79.0 77 3.2736 -90.5 88 2.8576 -91.5 3
66.6666666667
Sat Nov 24 15:42:57 2012 4 4 RSSIu = -87.5 RSSId = -92.0 Rot = 19480 ED =
33 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 66 0 7 0 ID = 66 10 222 c= 0 0 33 200 575
1.84 0 0.0 -74.0 99 2.736 -88.5 33 2.4768 -95.0 44 2.4192 -80.0 55 2.4736
-96.5 66 0.0 -78.0 77 3.2736 -90.5 88 2.8576 -92.0 4 50.0
Sat Nov 24 15:43:11 2012 5 5 RSSIu = -87.5 RSSId = -92.0 Rot = 19528 ED =
37 Erro = 3 dif_rot = 0 dl= 66 0 7 0 ID = 66 10 222 c= 0 0 37 200 572
1.8304 0 0.0 -74.0 99 2.736 -89.0 33 2.416 -95.5 44 2.3904 -80.0 55
2.4544 -96.0 66 0.0 -78.0 77 3.2736 -90.0 88 2.8672 -92.0 5 60.0
Sat Nov 24 15:43:14 2012 6 6 RSSIu = -87.5 RSSId = -91.5 Rot = 19540 ED =
38 Erro = 3 dif_rot = 0 dl= 66 0 7 0 ID = 66 10 222 c= 0 0 38 200 576
1.8432 0 0.0 -74.0 99 2.736 -88.5 33 2.5056 -96.0 44 2.3488 -80.0 55
2.3616 -96.0 66 0.0 -78.0 77 3.2736 -90.5 88 2.8736 -91.5 6 50.0

```

Figura 62. Captura de quadros no ponto A

```

Sat Nov 24 15:47:18 2012 1 1 RSSIu = -72.0 RSSId = -91.5 Rot = 20392 ED =
109 Erro = 1 dif_rot = 0 dl= 66 0 7 0 ID = 66 10 222 c= 0 0 109 200 569
1.8208 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.5216 -96.5 44 2.416 -80.0 55
2.4128 -96.0 66 0.0 -78.0 77 3.2736 -90.5 88 2.8864 -91.5 1 100.0
Sat Nov 24 15:47:22 2012 2 2 RSSIu = -84.5 RSSId = -92.0 Rot = 20404 ED =
110 Erro = 1 dif_rot = 0 dl= 66 0 7 0 ID = 66 10 222 c= 0 0 110 200 569
1.8208 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.4256 -94.5 44 2.4032 -80.0 55
2.2848 -95.5 66 0.0 -78.0 77 3.2736 -91.0 88 2.8832 -92.0 2 50.0
Sat Nov 24 15:47:25 2012 3 3 RSSIu = -79.0 RSSId = -91.5 Rot = 20416 ED =
111 Erro = 1 dif_rot = 0 dl= 66 0 7 0 ID = 66 10 222 c= 0 0 111 200 568
1.8176 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.4224 -96.0 44 2.4128 -79.5 55
2.2816 -96.0 66 0.0 -78.5 77 3.2736 -90.5 88 2.8864 -91.5 3 33.3333333333
Sat Nov 24 15:47:39 2012 4 4 RSSIu = -65.0 RSSId = -92.0 Rot = 20464 ED =
115 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 66 0 7 0 ID = 66 10 222 c= 0 0 115 200 572
1.8304 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.4896 -97.0 44 2.3456 -80.0 55
2.4032 -96.5 66 0.0 -79.5 77 3.2736 -90.0 88 2.8864 -92.0 4 50.0
Sat Nov 24 15:47:42 2012 5 5 RSSIu = -87.0 RSSId = -92.0 Rot = 20476 ED =
350 Erro = 1 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 55 10 222 c= 0 1 94 200 0 0.0 0
0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.4256 -96.0 44 2.3456 -80.0 55 2.3936 -96.5
0 0.2336 -74.0 77 3.2736 -91.0 88 2.8832 -92.0 1 100.0
Sat Nov 24 15:47:42 2012 6 6 RSSIu = -65.0 RSSId = -92.0 Rot = 20476 ED =
116 Erro = 1 dif_rot = 0 dl= 66 0 7 0 ID = 66 10 222 c= 0 0 116 200 553
1.7696 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.4256 -96.0 44 2.3456 -80.0 55
2.3936 -96.5 66 0.0 -80.0 77 3.2736 -91.0 88 2.8832 -92.0 5 40.0

```

Figura 63. Captura de quadros no ponto B

```

Sat Nov 24 15:49:50 2012 10 10 RSSIu = -67.5 RSSId = -91.5 Rot = 20920 ED
= 385 Erro = 3 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 55 10 222 c= 0 1 129 200 655
2.096 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.4608 -96.0 44 2.32 -81.0 55 2.4512
-96.0 0 2.0256 -74.0 77 3.2736 -90.5 88 2.8928 -91.5 7 42.8571428571
Sat Nov 24 15:49:53 2012 11 11 RSSIu = -55.0 RSSId = -91.5 Rot = 20932 ED
= 386 Erro = 3 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 55 10 222 c= 0 1 130 200 0
0.0 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.4736 -96.0 44 2.3424 -79.5 55 2.4512
-95.0 0 0.2464 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.8928 -91.5 8 37.5
Sat Nov 24 15:49:57 2012 12 12 RSSIu = -53.5 RSSId = -91.5 Rot = 20944 ED
= 387 Erro = 3 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 55 10 222 c= 0 1 131 200 0
0.0 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -89.0 33 2.5216 -96.5 44 2.3424 -80.0 55 2.3904
-96.0 0 0.2752 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.8928 -91.5 9 33.3333333333
Sat Nov 24 15:50:00 2012 13 13 RSSIu = -66.0 RSSId = -92.0 Rot = 20956 ED
= 388 Erro = 3 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 55 10 222 c= 0 1 132 200 1023
3.2736 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -89.0 33 2.464 -95.5 44 2.4 79.5 55 2.4032
-96.0 0 3.2736 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.8896 -92.0 10 30.0
Sat Nov 24 15:50:03 2012 14 14 RSSIu = -71.5 RSSId = -92.0 Rot = 20968 ED
= 389 Erro = 3 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 55 10 222 c= 0 1 133 200 0
0.0 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.48 -95.5 44 2.4064 -81.5 55 2.4256 -
95.5 0 1.2 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.8896 -92.0 11 27.2727272727

```

Figura 64. Captura de quadros no ponto C

```

Sat Nov 24 15:52:35 2012 35 35 RSSIu = -82.5 RSSId = -91.5 Rot = 21496 ED
= 863 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 33 10 222 c= 0 3 95 200 724
2.3168 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -89.0 33 2.4128 -96.5 44 0.0 -74.0 0 0.0 -
74.0 0 1.8336 -74.0 77 3.2736 -90.5 88 2.9056 -91.5 18 11.1111111111
Sat Nov 24 15:52:35 2012 36 36 RSSIu = -76.5 RSSId = -91.5 Rot = 21496 ED
= 1151 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 44 10 222 c= 0 4 127 200 769
2.4608 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -89.0 33 2.4128 -96.5 44 2.3168 -81.5 0 0.0
-74.0 0 1.7504 -74.0 77 3.2736 -90.5 88 2.9056 -91.5 15 13.3333333333
Sat Nov 24 15:52:38 2012 37 37 RSSIu = -74.0 RSSId = -92.5 Rot = 21508 ED
= 864 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 33 10 222 c= 0 3 96 200 739
2.3648 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.4096 -96.5 44 0.0 -74.0 0 0.0 -
74.0 0 1.8304 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.9088 -92.5 19 10.5263157895
Sat Nov 24 15:52:38 2012 38 38 RSSIu = -62.5 RSSId = -92.5 Rot = 21508 ED
= 1152 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 44 10 222 c= 0 4 128 200 767
2.4544 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.4096 -96.5 44 2.3648 -84.5 0 0.0
-74.0 0 1.7536 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.9088 -92.5 16 12.5
Sat Nov 24 15:52:41 2012 39 39 RSSIu = -75.0 RSSId = -92.0 Rot = 21520 ED
= 865 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 33 10 222 c= 0 3 97 200 729
2.3328 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -89.0 33 2.4448 -96.5 44 0.0 -74.0 0 0.0 -
74.0 0 1.8336 -74.0 77 3.2736 -90.5 88 2.9056 -92.0 20 10.0
Sat Nov 24 15:52:42 2012 40 40 RSSIu = -61.0 RSSId = -92.0 Rot = 21520 ED
= 1153 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 44 10 222 c= 0 4 129 200 740
2.368 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -89.0 33 2.4448 -96.5 44 2.3328 -84.5 0 0.0 -
74.0 0 1.7632 -74.0 77 3.2736 -90.5 88 2.9056 -92.0 17 11.7647058824

```

Figura 65. Captura de quadros no ponto D

```

Sat Nov 24 15:53:40 2012 3 3 RSSIu = -55.0 RSSId = -92.0 Rot = 21724 ED =
882 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 33 10 222 c= 0 3 114 200 735
2.352 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.5184 -98.5 44 0.0 -74.0 0 0.0 -
74.0 0 1.8176 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.9088 -92.0 2 100.0
Sat Nov 24 15:53:43 2012 4 4 RSSIu = -56.0 RSSId = -92.0 Rot = 21736 ED =
883 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 33 10 222 c= 0 3 115 200 744
2.3808 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.512 -97.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -
74.0 0 1.8176 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.9056 -92.0 3 66.6666666667
Sat Nov 24 15:53:47 2012 5 5 RSSIu = -55.5 RSSId = -92.5 Rot = 21748 ED =
884 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 33 10 222 c= 0 3 116 200 730
2.336 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.48 -98.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 1.8112 -74.0 77 3.2736 -89.5 88 2.9024 -92.5 4 50.0
Sat Nov 24 15:53:47 2012 6 6 RSSIu = -89.0 RSSId = -92.5 Rot = 21748 ED =
1172 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 44 10 222 c= 0 4 148 200 732
2.3424 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -88.5 33 2.48 -98.0 44 2.336 -80.0 0 0.0 -
74.0 0 1.7472 -74.0 77 3.2736 -89.5 88 2.9024 -92.5 2 100.0
Sat Nov 24 15:53:50 2012 7 7 RSSIu = -57.5 RSSId = -91.5 Rot = 21760 ED =
885 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 33 10 222 c= 0 3 117 200 734
2.3488 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -89.0 33 2.5184 -95.5 44 0.0 -74.0 0 0.0 -
74.0 0 1.8144 -74.0 77 3.2736 -90.5 88 2.9024 -91.5 5 40.0
Sat Nov 24 15:53:50 2012 8 8 RSSIu = -87.0 RSSId = -91.5 Rot = 21760 ED =
1173 Erro = 2 dif_rot = 0 dl= 0 0 7 0 ID = 44 10 222 c= 0 4 149 200 767
2.4544 0 0.0 -74.0 99 2.7328 -89.0 33 2.5184 -95.5 44 2.3488 -80.5 0 0.0
-74.0 0 1.7472 -74.0 77 3.2736 -90.5 88 2.9024 -91.5 3 66.6666666667

```

Figura 66. Captura de quadros no ponto E

```

Sat Nov 24 15:57:37 2012 31 31 RSSIu = -64.0 RSSId = -91.5 Rot = 22552 ED
= 1556 Erro = 1 dif_rot = 8 dl= 0 0 7 0 ID = 99 10 222 c= 0 6 20 200 787
2.5184 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -88.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 1.888 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.848 -91.5 10 10.0
Sat Nov 24 15:57:40 2012 32 32 RSSIu = -61.0 RSSId = -92.0 Rot = 22564 ED
= 1557 Erro = 1 dif_rot = 8 dl= 0 0 7 0 ID = 99 10 222 c= 0 6 21 200 753
2.4096 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -88.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 1.888 -74.0 77 3.2736 -90.5 88 2.8512 -92.0 11 9.09090909091
Sat Nov 24 15:57:44 2012 33 33 RSSIu = -62.5 RSSId = -92.0 Rot = 22576 ED
= 1558 Erro = 1 dif_rot = 8 dl= 0 0 7 0 ID = 99 10 222 c= 0 6 22 200 753
2.4096 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -88.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 1.888 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.848 -92.0 12 8.3333333333333
Sat Nov 24 15:57:47 2012 34 34 RSSIu = -63.5 RSSId = -92.0 Rot = 22588 ED
= 1559 Erro = 1 dif_rot = 8 dl= 0 0 7 0 ID = 99 10 222 c= 0 6 23 200 752
2.4064 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -88.5 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 1.8848 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.848 -92.0 13 7.69230769231
Sat Nov 24 15:57:51 2012 35 35 RSSIu = -66.0 RSSId = -92.0 Rot = 22600 ED
= 1560 Erro = 1 dif_rot = 8 dl= 0 0 7 0 ID = 99 10 222 c= 0 6 24 200 771
2.4672 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -88.5 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 1.888 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.8448 -92.0 14 7.14285714286
Sat Nov 24 15:57:54 2012 36 36 RSSIu = -66.0 RSSId = -91.5 Rot = 22612 ED
= 1561 Erro = 1 dif_rot = 8 dl= 0 0 7 0 ID = 99 10 222 c= 0 6 25 200 776
2.4832 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -89.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 1.888 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.848 -91.5 15 6.66666666667

```

Figura 67. Captura de quadros no ponto F

```

Sat Nov 24 15:59:01 2012 24 24 RSSIu = -80.5 RSSId = -91.5 Rot = 22847 ED
= 0 Erro = 0 dif_rot = 3 dl= 0 6 4 88 ID = 8 10 8 c= 0 0 0 200 853 2.7296
0 0.0 -74.0 99 2.7296 -88.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0 0
1.8816 -74.0 77 3.2736 -91.0 88 2.8448 -91.5 24 12.5
Sat Nov 24 15:59:01 2012 25 25 RSSIu = -81.5 RSSId = -91.5 Rot = 22848 ED
= 0 Erro = 0 dif_rot = 3 dl= 0 7 84 84 ID = 8 10 8 c= 0 0 0 200 853
2.7296 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -88.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 1.8816 -74.0 77 3.2736 -91.0 88 2.8448 -91.5 25 12.0
Sat Nov 24 15:59:01 2012 26 26 RSSIu = -83.5 RSSId = -91.5 Rot = 22848 ED
= 770 Erro = 1 dif_rot = 3 dl= 0 0 7 0 ID = 77 10 222 c= 0 3 2 200 1023
3.2736 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -88.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 3.2736 -74.0 77 3.2736 -91.0 88 2.8448 -91.5 1 100.0
Sat Nov 24 15:59:01 2012 27 27 RSSIu = -86.0 RSSId = -91.5 Rot = 22848 ED
= 822 Erro = 1 dif_rot = 3 dl= 0 0 7 0 ID = 88 10 222 c= 0 3 54 200 890
2.848 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -88.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0 0
2.8352 -74.0 77 3.2736 -91.0 88 2.8448 -91.5 1 100.0
Sat Nov 24 15:59:01 2012 28 28 RSSIu = -82.0 RSSId = -91.5 Rot = 22849 ED
= 822 Erro = 1 dif_rot = 3 dl= 0 8 4 134 ID = 8 10 222 c= 0 3 54 200 853
2.7296 0 0.0 -74.0 99 2.5088 -89.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 0.0 -74.0 77 3.2736 -90.5 88 2.848 -91.5 26 11.5384615385
Sat Nov 24 15:59:03 2012 29 29 RSSIu = -82.0 RSSId = -91.5 Rot = 22850 ED
= 0 Erro = 1 dif_rot = 3 dl= 0 1 0 0 ID = 8 10 8 c= 0 0 0 200 863 2.7616
0 0.0 -74.0 99 2.5088 -89.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0 0
74.0 77 3.2736 -90.5 88 2.848 -91.5 27 11.1111111111

```

Figura 68. Captura de quadros no ponto G

```

Sat Nov 24 16:01:14 2012 16 16 RSSIu = -85.5 RSSId = -91.5 Rot = 23312 ED
= 0 Erro = 1 dif_rot = 3 dl= 0 5 84 84 ID = 8 10 8 c= 0 0 0 200 853
2.7296 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -89.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 1.8848 -74.0 77 3.2736 -91.0 88 2.8512 -91.5 15 20.0
Sat Nov 24 16:01:14 2012 17 17 RSSIu = -85.5 RSSId = -91.5 Rot = 23313 ED
= 0 Erro = 1 dif_rot = 3 dl= 0 5 4 88 ID = 8 10 8 c= 0 0 0 200 852 2.7264
0 0.0 -74.0 99 2.7296 -89.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0 0
1.8848 -74.0 77 3.2736 -91.0 88 2.8512 -91.5 16 18.75
Sat Nov 24 16:01:15 2012 18 18 RSSIu = -85.0 RSSId = -91.5 Rot = 23316 ED
= 0 Erro = 1 dif_rot = 4 dl= 0 7 84 84 ID = 8 10 8 c= 0 0 0 200 853
2.7296 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -89.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 1.8848 -74.0 77 3.2736 -91.0 88 2.8512 -91.5 17 23.5294117647
Sat Nov 24 16:01:15 2012 19 19 RSSIu = -76.0 RSSId = -91.5 Rot = 23316 ED
= 809 Erro = 1 dif_rot = 4 dl= 0 0 7 0 ID = 77 10 222 c= 0 3 41 200 1023
3.2736 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -89.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 3.2736 -74.0 77 3.2736 -91.0 88 2.8512 -91.5 1 100.0
Sat Nov 24 16:01:15 2012 20 20 RSSIu = -67.0 RSSId = -91.5 Rot = 23316 ED
= 861 Erro = 1 dif_rot = 4 dl= 0 0 7 0 ID = 88 10 222 c= 0 3 93 200 891
2.8512 0 0.0 -74.0 99 2.7296 -89.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 2.8416 -74.0 77 3.2736 -91.0 88 2.8512 -91.5 2 50.0
Sat Nov 24 16:01:15 2012 21 21 RSSIu = -86.0 RSSId = -91.5 Rot = 23317 ED
= 861 Erro = 1 dif_rot = 4 dl= 0 8 4 133 ID = 8 10 222 c= 0 3 93 200 853
2.7296 0 0.0 -74.0 99 2.4032 -89.0 33 0.0 -74.0 44 0.0 -74.0 0 0.0 -74.0
0 0.0 -74.0 77 3.2736 -90.0 88 2.8512 -91.5 18 22.2222222222

```

Figura 69. Captura de quadros no ponto H